

540734

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

Rec'd PCT/PTO 24 JUN 2005

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局(43) 国際公開日
2004年7月15日 (15.07.2004)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2004/059354 A1

(51) 国際特許分類7:

G02B 6/13

(71) 出願人(米国を除く全ての指定国について): 日本電信電話株式会社 (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION) [JP/JP]; 〒100-8116 東京都千代田区大手町 2丁目 3番 1号 Tokyo (JP).

(21) 国際出願番号:

PCT/JP2003/016725

(22) 国際出願日:

2003年12月25日 (25.12.2003)

(71) 出願人 および

(25) 国際出願の言語:

日本語

(72) 発明者: 小川 育生 (OGAWA,Ikuo) [JP/JP]; 〒180-8585 東京都 武蔵野市 緑町3丁目9-11 NTT知的財産センター内 Tokyo (JP).

(26) 国際公開の言語:

日本語

(72) 発明者; および

(30) 優先権データ:

特願 2002-378514

(75) 発明者/出願人(米国についてのみ): 橋本 俊和 (HASHIMOTO,Toshikazu) [JP/JP]; 〒180-8585 東京都 武蔵野市 緑町3丁目9-11 NTT知的財産センター内 Tokyo (JP). 北川 毅 (KITAGAWA,Takeshi) [JP/JP]; 〒180-8585 東京都 武蔵野市 緑町3丁目9-11 NTT知的財産センター内 Tokyo (JP). 鈴木 扇太 (SUZUKI,Senichi) [JP/JP]; 〒180-8585 東京都 武蔵野市 緑町3丁目9-11 NTT知的財産センター内 Tokyo (JP). 柳澤 雅

2002年12月26日 (26.12.2002) JP

特願 2003-336527 2003年9月26日 (26.09.2003) JP

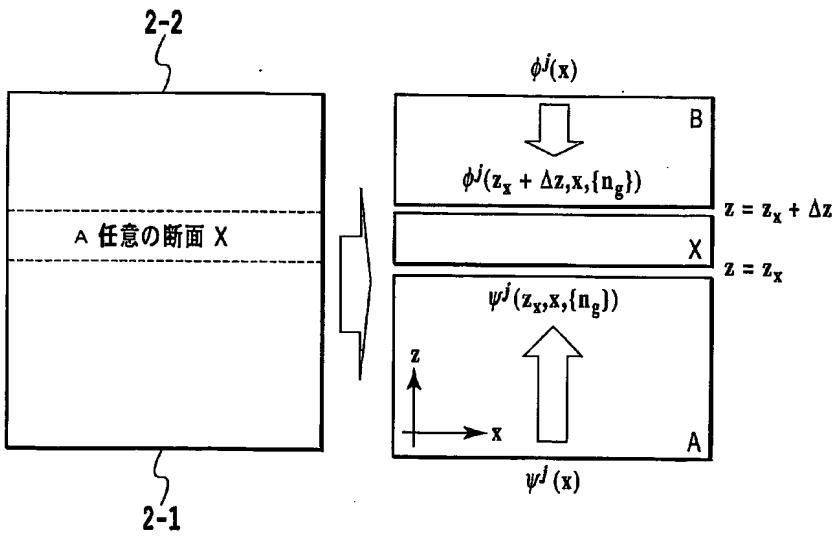
特願 2003-375986 2003年11月5日 (05.11.2003) JP

特願 2003-391495 2003年11月20日 (20.11.2003) JP

[続葉有]

(54) Title: WAVE TRANSMISSION MEDIUM AND WAVEGUIDE CIRCUIT

(54) 発明の名称: 波動伝達媒体および導波回路



A...GIVEN CROSS SECTION X

WO 2004/059354 A1

(57) Abstract: An input port and an output port are provided to a wave transmission medium. Field distribution 1 of a propagated light (forward propagated light) that has entered through the input port is determined by numerical calculation. Field distribution 2 of a phase conjugate light (reversely propagated light) is also determined by numerical calculation. The phase conjugate light is such that the output field expected when an optical signal that has entered through the input port is outputted from the output port is propagated reversely from the output port. From field distributions 1, 2, the spatial distribution of the index of refraction in a medium can be so determined that there is no phase difference between the propagated light and the reversely propagated light at each point (x, z).

[続葉有]

BEST AVAILABLE COPY



弘 (YANAGISAWA,Masahiro) [JP/JP]; 〒180-8585 東京都 武蔵野市 緑町3丁目9-11 NTT知的財産センター内 Tokyo (JP). 柴田 知尋 (SHIBATA,Tomohiro) [JP/JP]; 〒180-8585 東京都 武蔵野市 緑町3丁目9-11 NTT知的財産センター内 Tokyo (JP). 神徳 正樹 (KOUTOKU,Masaki) [JP/JP]; 〒180-8585 東京都 武蔵野市 緑町3丁目9-11 NTT知的財産センター内 Tokyo (JP). 高橋 浩 (TAKAHASHI,Hiroshi) [JP/JP]; 〒180-8585 東京都 武蔵野市 緑町3丁目9-11 NTT知的財産センター内 Tokyo (JP). 長瀬 亮 (NAGASE,Ryou) [JP/JP]; 〒180-8585 東京都 武蔵野市 緑町3丁目9-11 NTT知的財産センター内 Tokyo (JP). 小林 勝 (KOBAYASHI,Masaru) [JP/JP]; 〒180-8585 東京都 武蔵野市 緑町3丁目9-11 NTT知的財産センター内 Tokyo (JP). 浅川 修一郎 (ASAKAWA,Shuichiro) [JP/JP]; 〒180-8585 東京都 武蔵野市 緑町3丁目9-11 NTT知的財産センター内 Tokyo (JP). 阿部 宣輝 (ABE,Yoshiteru) [JP/JP]; 〒180-8585 東京都 武蔵野市 緑町3丁目9-11 NTT知的財産センター内 Tokyo (JP). 鬼頭 勤 (KITOH,Tsutomo) [JP/JP]; 〒180-8585 東京都 武蔵野市 緑町3丁目9-11 NTT知的財産センター内 Tokyo (JP). 大山 貴晴 (OHYAMA,Takaharu) [JP/JP]; 〒180-8585 東京都 武蔵野市 緑町3丁目9-11 NTT知的財産センター内 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 谷 義一 (TANI,Yoshikazu); 〒107-0052 東京都 港区赤坂 2丁目6-2 O Tokyo (JP).

(81) 指定国(国内): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(広域): ARIPO 特許 (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア特許 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ特許 (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI 特許 (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 國際調査報告書

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイドスノート」を参照。

(57) 要約: 波動伝達媒体に入力ポートと出力ポートとを設け、入力ポートから入射した伝搬光のフィールド分布1(順伝搬光)と、入力ポートから入射した光信号が出力ポートから出力される際に期待される出力フィールドを出力ポート側から逆伝搬させた位相共役光のフィールド分布2(逆伝搬光)と、を数値計算により求める。そして、これらのフィールド分布1および2をもとに、伝搬光と逆伝搬光の各点(x,z)における位相差をなくすように、媒体中での空間的な屈折率分布を求める。

明細書

発明の名称 波動伝達媒体および導波回路

技術分野

本発明は、波動伝達媒体およびこれを用いた導波回路ならびにそれらの製造方法に関し、より詳細には、2次元的な屈折率分布に応じた多重散乱に基づいて波動を伝達させる媒体およびこれを用いて構成された導波回路ならびにそれらの製造方法に関する。

背景技術

光通信などの技術分野においては、光の分岐・干渉を容易に実現するための光回路を構成するために、光導波路構造を利用した集積光部品が開発されてきた。このような波動としての性質を利用した集積光部品は、光導波路長などを調整したり光干渉計等の作製を容易化したりすることを可能とし、さらに、半導体分野における回路加工技術を適用することで、光部品の集積化も可能となる。

しかしながら、このような光導波路回路においては、光導波路中を伝搬する光を屈折率の空間的分布を利用して空間的な光閉じ込めを実現する「光閉じ込め構造」により光回路の各構成要素を構成するために、光配線などを用いた縦列的な回路設計が必要となる。このため、光導波路回路の光路長は、光回路内で干渉現象などを生じさせるために求められる光路長よりも長くならざるを得ず、その結果、光回路そのものが極めて大型になってしまふという問題があった。

たとえば、典型的なアレイ導波路格子を例にとると、入力ポートから入力された複数の波長(λ_1)の光はスラブ導波路を有するスター・カプラにより分波・合波を繰り返し、分波された光が出力ポートから出力されるが、波長の千分の1程度の分解能

で光を分波するために要する光路長は、導波路を伝搬する光の波長の数万倍となる。また、光回路の導波路パターンニングをはじめとして、偏光状態に依存する回路特性を補正するための波長板などを設けるための加工も施す必要がある。(例えば、Y. 5 Hibino, "Passive optical devices for photonic networks", IEIC Trans. Commun., Vol.E83-B No.10, (2000) 参照)。

また、光回路の小型化のためには光を導波路中に強く閉じ込める必要があるために、屈折率の空間的分布により光閉じ込め状態を制御するためには極めて大きな屈折率差を光導波路中にもたらせることが必要とされ、例えば従来のステップインデクッス型の光導波路では、比屈折率差が 0.1% よりも大きな値となるような屈折率の空間的分布を有するように光導波路が設計されていた。このような大きな屈折率差を利用して光閉じ込めを行うこととすると、回路構成の自由度が制限されてしまうという問題が生じる。特に、光導波路中での屈折率差を、局所的な紫外線照射、熱光学効果や電気光学効果などにより実現しようとする場合には、得られる屈折率の変化量は高々 0.1% 程度である場合が多く、光の伝搬方向を変化させる場合には光導波路の光路にそって徐々に向きを変化させざるを得ず、光回路長は必然的に極めて長いものとなってしまい、その結果として光回路の小型化が困難になってしまう。

さらに、グレーティング様の回路を光導波路回路に付与した回路は光の伝搬方向に対して概ね平行な向きの周期構造もしくは誘電体屈折率の周期変化により光回路を構成し、かつ、実際の設計においては概ねフーリエ変換で評価可能な強い周期性を有する構造もしくは周期性を僅かに歪ませたチャープ構造により光回路の特性を得るために、波面に対して概ね均一な構造となって伝搬方向に垂直な方向（波面に沿った方向）での光

制御が困難となる。例えば、T. W. Mossberg, "Planar holographic optical processing", Optics Letters, Vol. 26, No. 7, pp 414-416 (2001)に開示されている光回路では、光回路中で反射することなく透過する光は回路中に広がってしまい
5 信号光として利用することができない。また、分岐回路のように伝搬方向に垂直な方向へ大きくスポット位置を変化させる回路では、光が形成する「場」(フィールド)を伝搬方向と垂直方向に大きく広げる必要があり回路が大きくならざるを得ない。
さらに、実際の回路の設計においても、ファイバグレーティングのような従来の1次元のグレーティング回路の設計方法とほぼ等価な設計方法しか実現できないために、周期性の強い構造
10 (すなわち、伝搬方向の波数に依存した光回路)に限定され、回路規模が大きくなり、波長に敏感になり易く、入出力の位置が波長の順に連続的に分布してしまうなど、設計の自由度が低い
15 回路に限定されるという問題があった。

一方、現在では通信容量の拡大のために複数の光波長を用いた光波長多重通信システムの開発が盛んに行われており、この光波長多重通信システムにおいて、複数の波長の光信号を送信機側で合波したり、1本の光ファイバ中を伝搬する複数の光信号を受信機側で異なるポートに分波するための光波長合分波回路として、アレイ導波路回折格子型光合分波回路が広く用いられている。

図1は、従来のアレイ導波路回折格子型光合分波回路の構成例を説明するための図である(例えば、K. Okamoto, "Fundamentals of Optical Waveguides", Academic Press (2000)参照)。この回路は、基板100上に設けられた、入力導波路101と第1のスラブ導波路102とアレイ導波路103と第2のスラブ導波路104と出力導波路105とが順次接続

されて構成されている。

入力導波路 101 から入力された光は第 1 のスラブ導波路 102 により拡げられ、各波長に対応する導波路で構成されたアレイ導波路 103 へと分波される。そして、第 2 のスラブ導波路 104 で再び合波されて出力導波路 105 へと導かれる。ここで、第 1 のスラブ導波路 102 のアレイ導波路 103 側の端部に投射された光フィールドパターンは、基本的には、第 2 のスラブ導波路 104 のアレイ導波路 103 側の端部に再生（コピー）されることになるが、アレイ導波路 103 は、互いに隣り合う光導波路の光路長がちょうど△しだけ異なるように設計されているため、光フィールドは、入力された光の波長に依存して傾きをもつこととなる。この傾きにより、第 2 のスラブ導波路 104 の出力導波路 105 側の端部で光フィールドが焦点を結ぶ位置が波長ごとに変化し、これにより波長分波が可能となる。

このようなアレイ導波路格子型光合分波回路は、複数の波長の光信号を 1 本の光ファイバ中で伝送させる光多重通信システムにおいて必要不可欠な光部品となりつつある。また、図 1 に示したアレイ導波路格子型光合分波回路の透過波長帯域幅を拡げたバスバンド拡大アレイ導波路格子型光合分波回路の提案も種々行われている。

図 2 A および図 2 B は、従来提案されているバスバンド拡大アレイ導波路格子型光合分波回路の構成例を説明するための図である（例えば、K. Okamoto and A. Sugita, “Flat spectral response arrayed-waveguide grating multiplexer with parabolic waveguide horns”, Electronics Letters, Vol. 32, No. 18, pp. 1661-1662 (1996) 参照）。

この回路は、図 2 A に示すように、図 1 に示した回路において、入力導波路 101 と第 1 のスラブ導波路 102 との間に、

図 2 B に示した形状のパラボラ導波路 106 を設けて構成される回路である。なお、図中の z は、光の伝搬方向を示している。

図 3 A および図 3 B は、図 2 A の回路構成とした場合の、パラボラ導波路 106 のスラブ導波路 102 との接続面における光フィールド分布を説明するための図で、z は光の伝搬方向、x は z 方向と垂直な導波路の断面方向を意味している。この図に示すように、光フィールド分布はダブルピークを有する分布形状となる。第 2 のスラブ導波路 104 の出力導波路側でこのダブルピークをもつ光フィールドが再生されて出力導波路 105 に結合することとなるため、透過波長帯域の拡大が実現されることとなる。

しかしながら、上述した従来構成のパスバンド拡大アレイ導波路格子型光合分波回路は、図 4 に示すように、パラボラ導波路内の位相分布に起因する大きな波長分散値を有する。波長分散は信号スペクトル成分に異なる遅延時間を与えるため、大きな波長分散を有する従来のパスバンド拡大アレイ導波路格子型光合分波回路では光パルス劣化が著しいという問題がある。

発明の開示

本発明は、このような課題に鑑みてなされたもので、従来の光導波路回路や平面ホログラフィック回路を用いた光回路よりも小型で、光の入出力を可能な限り自由に設定でき、さらに、緩やかな屈折率分布（小さな高低差）でも充分に高効率の光信号制御を可能とする光回路を実現するための光（波動）伝達媒体を提供し、これにより、高効率で小型の導波回路を実現すること、および、波長分散の小さなアレイ導波路格子型光合分波回路を提供することを目的としている。

本発明はこのような目的を達成するために、第 1 の発明は、所望の光入出力のある断面が与えられるべき回路上の場所をポ

ートとよぶときに、入力側ポート（入力ポート）からの入射光を所望の出力側ポート（出力ポート）に出力する波動伝達媒体であって、前記波動伝達媒体は、前記入力ポートからの入射光が当該波動伝達媒体中で多重散乱しながら伝搬するよう決定された空間的な屈折率分布を有し、当該波動伝達媒体内の局所的な位置は、仮想的なメッシュにより画定される仮想的なピクセルにより指定され、前記ピクセルの各々が有する屈折率により前記波動伝達媒体の空間的な屈折率分布を成すことを特徴とする。

10 好ましくは、前記波動伝達媒体の屈折率分布は、前記入力ポートからの入射光の順伝搬光のフィールドの位相と前記出射光を位相共役に逆伝搬させた逆伝搬光のフィールドの位相との差を、前記波動伝達媒体の各点において整合させるように設定されている。

15 また、好ましくは、前記ピクセルの取り得る屈折率は、低屈折率 (n_L) または高屈折率 (n_H) の何れかであり、前記屈折率分布は、低屈折率 (n_L) を有するピクセルと高屈折率 (n_H) を有するピクセルを空間的に配置することにより与えられるものである。

20 また、好ましくは、前記低屈折率 (n_L) を有するピクセルの、前記波動伝達媒体中における前記入射光の伝搬方向での存在確率は、30%以下である。

また、好ましくは、前記ピクセルは、下限屈折率と上限屈折率との間の有限個の屈折率を取り得、前記屈折率分布は当該有限個の屈折率のうちの何れかの屈折率を有する前記ピクセルを空間的に配置することにより与えられるものである。

また、好ましくは、前記入力ポートから入射される光を、所

望の割合で互いに異なる出力ポート位置に分波されるように前記屈折率分布が決定されている。

また、好ましくは、前記入力ポートから入射される光は複数の波長の光の波長多重光であり、当該波長多重光をなす各々の波長の光に対応付けられた互いに異なる出力ポート位置に分波されるように前記屈折率分布が決定されている。
5

また、好ましくは、前記入力ポートから入射される光は複数の波長の光の波長多重光であり、当該波長多重光をなす各々の波長の光が所望の割合で互いに異なる出力ポート位置に分波されるように前記屈折率分布が決定されている。
10

また、好ましくは、前記入力ポートから入射される光はTEモードとTMモードの偏波多重光であり、当該偏波多重光をなす各々の偏波に対応付けられた互いに異なる出力ポート位置に分波されるように前記屈折率分布が決定されている。

また、好ましくは、前記入力ポートから入射される光はTEモードとTMモードの偏波多重光であり、当該偏波多重光をなす各々の偏波が所望の割合で互いに異なる出力ポート位置に分波されるように前記屈折率分布が決定されている。
15

また、好ましくは、前記波動伝達媒体を構成する物質は誘電体である。
20

第2の発明は、本発明の波動伝達媒体の製造方法であって、初期屈折率分布を仮定した前記波動伝達媒体中において、前記入射光のフィールド分布1と、前記出射光を前記出力ポートから仮想的に逆伝搬させた光のフィールド分布2と、を求める第25 1のステップと、前記波動伝達媒体の各点において、前記フィールド分布1と前記フィールド分布2との位相差が少なくなるように、前記屈折率分布を決定する第2のステップと、前記出

力ポート位置において、前記フィールド分布1と前記出射光のフィールド分布とが所望の誤差以下となるまで、前記第1のステップと前記第2のステップとを繰り返して前記屈折率分布を逐次近似する第3のステップと、を備えていることを特徴とする。
5

好ましくは、前記第2のステップにおける屈折率分布の決定は、前記ピクセルの各々の屈折率を変数とする最急降下法により実行される。

第3の発明は、本発明の波動伝達媒体の製造方法であって、
10 前記屈折率分布を逐次近似するための第1のルーチンと第2のルーチンとを備え、前記第1のルーチンは、初期屈折率分布を仮定した前記波動伝達媒体中において、前記入射光のフィールド分布1と、前記出射光を前記出力ポートから仮想的に逆伝搬させた光のフィールド分布2と、を求める第1のステップと、
15 前記波動伝達媒体内の位置における前記フィールド分布2の位相が当該位置における前記フィールド分布1の位相と整合するように前記屈折率分布を変更する第2のステップと、当該変更後の屈折率分布を用いて前記位置におけるフィールド分布2を求め直す第3のステップと、前記位置を逆伝搬方向に所定量だけ移動させて新たな位置として定義し直す第4のステップと、
20 前記第1乃至4のステップを繰り返して前記屈折率分布を逐次近似する第5のステップと、を備え、前記第2のルーチンは、前記第1のルーチンで決定された屈折率分布を仮定した前記波動伝達媒体中において、前記出射光のフィールド分布1と、前記出射光を前記出力ポートから仮想的に逆伝搬させた光のフィールド分布2と、を求める第6のステップと、前記波動伝達媒体内の位置における前記フィールド分布1の位相が当該位置に
25

おける前記フィールド分布2の位相と整合するように前記屈折率分布を変更する第7のステップと、当該変更後の屈折率分布を用いて前記位置におけるフィールド分布1を求め直す第8のステップと、前記位置を順伝搬方向に所定量だけ移動させて新たな位置として定義し直す第9のステップと、前記第6乃至9のステップを繰り返して前記屈折率分布を逐次近似する第10のステップと、を備えていることを特徴とする。

好ましくは、前記第2のステップにおいて、前記フィールド分布2としては、逐次近似前の屈折率分布中で前記出射光を入射面まで伝搬させたときのフィールド分布を当該逐次近似前の屈折率分布中で順伝搬させて得られたフィールド分布を用い、前記フィールド分布1としては、逐次近似前の屈折率分布中で前記入射光を出射面まで伝搬させたときのフィールド分布を当該逐次近似前の屈折率分布中で逆伝搬させて得られたフィールド分布を用いる。

また、好ましくは、前記出力ポート位置における前記フィールド分布1と前記出射光のフィールド分布とが所望の誤差以下となるまで、前記第1のルーチンと前記第2のルーチンを順次繰り返す第3のルーチンを備えている。

また、好ましくは、前記フィールド分布1および前記フィールド分布2の各々には、前記波動伝達媒体中における、前記入射光および逆伝搬光の各々の反射光成分が繰込まれている。

また、好ましくは、前記初期屈折率分布としてランダム分布を仮定する。

また、好ましくは、前記入力ポートからの入射光は複数の波長の光の波長多重光またはTEモードとTMモードの偏波多重光であり、前記屈折率分布の逐次近似は、前記多重光の各波長

の光ごとまたは各編波ごとに定義されたフィールド分布 2 を用いて順次実行され、前記多重光をなす各波が所望の割合で互いに異なる出力ポート位置に分波されるように前記屈折率分布が決定されている。

5 第 4 の発明は、基板上に、本発明の波動伝達媒体を 2 次元的に配置して構成されていることを特徴とする導波回路である。

好ましくは、この導波回路を用いて多モード干渉回路が構成されている。

10 第 5 の発明は、本発明の導波回路を用いて構成された下記のような光回路である。

すなわち、本発明の導波回路を用いて構成された光曲げ回路や、導波回路の屈折率分布が電気光効果に基づく当該導波路回路の局所的な屈折率変化により実現されている光回路や、ピクセルの各々の屈折率が前記基板に対して垂直方向に光を閉じ込めるように決定されている光回路などである。

好ましくは、前記仮想的なメッシュは、周期的な繰り返しにより前記導波領域を形成する単位格子の構成要素である。

また、好ましくは、前記単位格子は、準周期構造を形成する形状を有するものである。

20 また、好ましくは、前記ピクセルが取り得る屈折率値は 2 値化されており、高屈折率 (n_H) または低屈折率 (n_L) の何れかである。

また、好ましくは、前記高屈折率を有するピクセルのサイズは、前記導波領域内を伝搬する光の波長以下に設定されている。

25 また、好ましくは、次式で与えられる値が 0 . 1 以下である。

$$\frac{\lambda q}{\pi n a}$$

(λ : 伝搬光波長、 n : 高屈折率を有するピクセルの屈折率値

(n_H)、 a : 高屈折率を有するピクセルの高さ、 q : 伝搬光のフィールド分布の放射成分の平均距離を z としたとき $q = (z/a)$ で与えられる係数)

また、好ましくは、前記高屈折率を有するピクセルは n 角形
5 (n は3以上の整数)の多角形状を有し、当該の何れの辺も、前記導波領域を伝搬する光の伝搬方向と傾斜するように前記ピクセルが配置されている。

また、好ましくは、前記多角形状は正方形であり、前記傾斜の角度が45度である。

10 また、好ましくは、前記ピクセルの各々は、前記仮想的なメッシュにより画定される領域以上の所望のサイズを有し、前記ピクセルの何れかは、前記仮想的なメッシュにより画定される格子位置からはずれた位置に配置されている。

また、好ましくは、前記高屈折率(n_H)を有するピクセル
15 は、第1の高屈折率層と当該第1の高屈折率層よりも低い屈折率を有する第2の高屈折率層とを順次積層させた導波部を有する一方、前記低屈折率(n_L)を有するピクセルは、前記第2の高屈折率層からなる導波部を有し、前記前記高屈折率(n_H)を有するピクセルの導波部を伝搬する光フィールド径の中心位置と前記前記低屈折率(n_L)を有するピクセルの導波部を伝搬する光フィールド径の中心位置とが、前記基板表面と平行な同一平面上にあるように設定されている。

また、好ましくは、前記導波領域は誘電体材料で構成されており、当該誘電体材料は、光損失機能または光増幅機能を備えている。

また、好ましくは、前記誘電体材料は、光の波長に依存する複素屈折率を有する。

また、好ましくは、前記導波領域は、少なくとも、第1の低屈折率層と導波部である高屈折率層と第2の低屈折率層とが順

次積層された構造を有し、当該第1および第2の低屈折率層により前記高屈折率層中に光が閉じ込められる。

また、好ましくは、前記高屈折率層の少なくとも一方の表面上には、凹部を設けることでレリーフ状のパターンニングが施されており、前記凹部を低屈折率部とし当該凹部以外の部分を高屈折率部とすることにより前記空間的屈折率分布が与えられている。
5

また、好ましくは、前記レリーフ状のパターンニングが、前記高屈折率層の両面に施されている。

10 また、好ましくは、前記高屈折率層の両面に施されたレリーフ状のパターンは、互いに異なるパターンである。

また、好ましくは、前記高屈折率層の両面に施されたレリーフ状のパターンの前記凹部の深さが、何れも等しい。

15 また、好ましくは、前記ピクセルは、高屈折率 (n_H) または低屈折率 (n_L) の何れかの2値化された屈折率を有する複数の仮想のサブピクセルに分割されており、当該2値化されたサブピクセルの配列により前記ピクセルの屈折率分布が与えられている。

また、好ましくは、前記ピクセルでは屈折率差の変化の割合として屈折率差を1波長以上の距離をかけて変化させる（伝搬光の波面進行方向への伝搬定数の空間的变化割合）。

また、好ましくは、前記ピクセルまたは前記サブピクセルの前記基板と平行な断面形状は、円形である。

20 また、好ましくは、前記ピクセルまたは前記サブピクセルの前記基板に垂直な断面形状は、滑らかに変化する曲線を有する形状である。

また、好ましくは、前記第1または第2の低屈折率層の少なくとも一方は、互いに屈折率が異なる複数の層を積層させて構

成されている。

また、好ましくは、前記光回路は3つ以上の入出力ポートを備えた相互一斉配信・一斉受信構成の光回路であり、前記空間的屈折率分布は、前記入出力ポートから出力される信号の位相が互いに直交するように設定されている。
5

また、好ましくは、前記光回路は3つ以上の入出力ポートを備えた相互一斉配信・一斉受信構成の光回路であり、前記空間的屈折率分布は、前記入出力ポートから出力される信号の位相が互いに直交しない場合に出力信号の重なりを最小とするよう¹⁰に設定されている。

また、好ましくは、前記光回路の分岐比率が非対称である。

また、好ましくは、上記光回路には増幅機能が備えられている。

また、好ましくは、前記光回路は複数の入力ポートを有し、¹⁵かつ、当該複数の入力ポートから入力された光信号が同一の出射面から出力されるように構成されており、前記空間的屈折率分布は、前記複数の入力ポートから出力される各々の信号光の互いの位相を調整して重ねあわせ、出力される光フィールド形状を整形するように設定されている。

また、好ましくは、前記光回路と、その回路の複数入力ポート間に位相差をつけて光を入射する回路を前段に配置するとともに、前記回路の出力をアレイ導波路回折格子の入力部に配置し、フィールドのピーク位置をアレイ導波路回折格子の出力周波数間隔で移動させ、フィルタをフラット化させるように設定²⁵されている。

また、好ましくは、前記空間的屈折率分布は、出力光のスポットサイズ変換をもたらす、フィールド強度と位相分布を、可能とするように設定されている。

第 6 の発明は、本発明の導波回路を用いて構成されたアレイ導波路格子型光合分波回路であって、平面基板上に、入力導波路と第 1 のスラブ導波路とアレイ導波路と第 2 のスラブ導波路と出力導波路とが順次接続されており、前記入力導波路と前記 5 第 1 のスラブ導波路との接続領域には、当該入力導波路の屈折率に比較して高屈折率の散乱点が複数配置されて設けられていることを特徴とする。

好ましくは、前記散乱点は、前記入力導波路の出力端に形成される光フィールド分布の等位相面に歪がなく且つ振幅にダブルピーケークを有するように配置されている。

また、好ましくは、前記散乱点の前記入力導波路内の 2 次元的な配置分布は、前記光の伝搬方向に伸びる直線に対して概ね線対称である。

また、好ましくは、前記散乱点の 1 辺の長さは、0. 2 μm 15 以上である。

また、好ましくは、前記平面基板はシリコン基板であり、前記光導波路は石英系ガラス光導波路である。

本発明により、従来の光導波路回路や平面ホログラフィック回路を用いた光回路よりも小型で、光の入出力を可能な限り自由に設定でき、さらに、緩やかな屈折率分布（小さな屈折率高低差）でも充分に高効率な光信号制御を可能とする導波回路を実現するための光（波動）伝達媒体を提供し、これにより、高効率で小型の光回路を実現することが可能となる。

また、本発明のアレイ導波路型光合分波回路は、入力導波路内に空間的屈折率分布に基づく複数の散乱点を配置することにより伝搬光の位相と強度とを同時に制御することとしたので、波長分散を低減した低分散のアレイ導波路型光合分波回路の提供が可能となる。

図面の簡単な説明

図 1 は、従来のアレイ導波路回折格子型光合分波回路の構成例を説明するための図、

図 2 A および図 2 B は、従来提案されているパスバンド拡大
5 アレイ導波路格子型光合分波回路の構成例を説明するための図
、

図 3 A および図 3 B は、図 2 A の回路構成とした場合の、パラボラ導波路のスラブ導波路との接続面における光フィールド分布を説明するための図、

10 図 4 は、従来構成のパスバンド拡大アレイ導波路格子型光合分波回路の波長分散値を説明するための図、

図 5 A ~ 5 C は、本発明の波動伝達媒体の基礎となる基本概念と基本構造とを説明するための図、

15 図 6 は、従来のアレイ導波路格子回路の構成例を説明するための図、

図 7 は、本発明の波動伝達媒体の空間的な屈折率分布を決定するための計算手順を説明するためのフローチャート、

図 8 は、計算手順の理解を容易にするために、波動伝達媒体中でのフィールドの様子の一例を示した図、

20 図 9 A および図 9 B は、実施例 1 における光回路設計の設定を説明するための図、

図 10 A および図 10 B は、実施例 1 による屈折率分布（図 10 A）と透過スペクトル（図 10 B）を説明するための図、

25 図 11 A ~ 11 C は、平面光波回路状の屈折率分布を有し、かつ、基板垂直方向での光閉じ込め可能な実施例 1 の光回路を説明するための図、

図 12 は、実施例 2 の光回路設計のフローを簡単に示したフ

ローチャート、

図 1 3 A～1 3 C は、図 1 2 に示したアルゴリズムを実行するための、フィールドのデータを説明するための図、

図 1 4 A は、実施例 1 の計算の収束の様子を示した図、

5 図 1 4 B は、実施例 2 の計算の収束の様子を示した図、

図 1 5 A は、実施例 2 の光回路の屈折率分布を説明するための図、

図 1 5 B は、実施例 2 の光回路の透過スペクトルを説明するための図、

10 図 1 6 A および図 1 6 B は、実施例 3 の 4 波長分波器の光回路設計のための条件設定を説明するための図、

図 1 7 A および図 1 7 B は、実施例 3 で計算した光回路の透過損失スペクトラム（透過率（dB））を説明するための図、

15 図 1 8 A は、実施例 4 の光回路設計のための条件設定を説明するための図で、単純なバンド透過フィルタを設定した場合の図、

図 1 8 B は、実施例 4 の光回路設計のための条件設定を説明するための図で、バンド整形用のダミーポートを設けた場合の図、

20 図 1 9 A は、図 1 8 A に示した条件設定の下で調整された光回路の出力ポートから出力される出力光の透過損失のスペクトラム、

25 図 1 9 B は、図 1 8 B に示した条件設定の下で調整された光回路の出力ポートから出力される出力光の透過損失のスペクトラム、

図 2 0 A は、実施例 5 の光回路の設定条件を説明するための図、

図 2 0 B は、実施例 5 の光回路の透過損失のスペクトラムを説明するための図、

図 2 1 A は、実施例 6 の光回路の入出力ペアの設定を説明するための図、

5 図 2 1 B は、実施例 6 の光回路の $1.55\mu\text{m}$ の出射フィールド分布の設定を説明するための図、

図 2 1 C は、実施例 6 の光回路の、ポート a から入力光を入力させた場合の出力光の透過損失スペクトラムを説明するための図、

10 図 2 1 D は、実施例 6 の光回路の、ポート b から入力光を入力させた場合の出力光の透過損失スペクトラムを説明するための図、

15 図 2 2 は、実施例 7 において反射成分をも考慮する際の伝搬行列の取扱いの概要を説明するための図で、光回路中の微小部分のみに着目して図示した図、

図 2 3 A は、実施例 7 の光回路（波長フィルタ）の設定条件を説明するための図、

図 2 3 B は、実施例 7 の光回路（波長フィルタ）の透過損失のスペクトラムを説明するための図、

20 図 2 4 A は、実施例 8 の 16 分岐光回路における、屈折率分布を説明するための図で、

図 2 4 B は、実施例 8 の 16 分岐光回路における、光伝搬の様子を説明するための図、

25 図 2 4 C は、実施例 8 の 16 分岐光回路における、16 個の各出力ポートから出力される光の光透過損失 d B を示す図、

図 2 5 A は、実施例 9 の曲げ回路の屈折率分布を説明するための図、

図 25 B は、実施例 9 の曲げ回路の光伝搬の様子を説明するための図、

図 26 A は、実施例 10 における光回路設計領域における屈折率分布を説明するための図、

5 図 26 B は、実施例 10 における光回路中を伝搬する光の波長毎のフィールドの伝搬の様子を説明するための図、

図 27 A は、実施例 11 における光回路設計領域内の屈折率分布を説明するための図、

10 図 27 B は、実施例 11 における光回路設計領域内の、単位長さ当たりの導波路中に空隙が出現する確率（横軸）と、高屈折率部の空隙が連続する（すなわち低屈折率部が連続する）ピクセルの数 N_g 每の頻度（縦軸）との関係を説明するための図、

図 28 A は、実施例 12 の電極構造の断面図、

15 図 28 B は、図 28 A に示した素子を用いた光回路の構成例を説明するための図、

図 29 A および図 29 B は、実施例 13 の $1.31 \mu\text{m}/1.55 \mu\text{m}$ の波長フィルタの構成例を説明するための図、

20 図 30 は、実施例 13 の光回路を構成する誘電体のピクセルを光の散乱点として考えた場合の光の広がりの様子を説明するための図、

図 31 A および図 31 B は、ピクセルサイズ W をパラメータとして変化させて $1.31 \mu\text{m}/1.55 \mu\text{m}$ の波長フィルタの光回路を構成した場合の、透過損失特性および漏話特性のピクセルサイズ依存性を説明するための図、

25 図 32 A および図 32 B は、実施例 14 の平面光回路における、基板垂直方向と基板水平方向での光の閉じ込めレベルを説明するための図、

図 33 は、最小ピクセル単位を $3 \mu\text{m}$ 角としたときの 1 点当

たりの放射損失（結合損失）のフィールド半径依存性を説明するための図、

図34Aは、実施例15における、ピクセルを光伝搬方向に配置した光回路を説明するための図、

5 図34Bは、実施例15における、ピクセルを光伝搬方向に對して傾斜させて配置した光回路を説明するための図、

図35Aは、実施例16における、仮想的なメッシュで画定された格子点にピクセルを配置して屈折率分布を形成した光回路を説明するための図、

10 図35Bは、実施例16における、格子点の位置とは無関係にy方向でのピクセル配置を行って屈折率分布を形成した光回路を説明するための図、

15 図36Aは、図35Aに示したピクセル配置に対応させて作製した実際の光回路（1.31μmと1.55μmの波長フィルタ）の屈折率分布を説明するための図、

図36Bは、図35Bに示したピクセル配置に対応させて作製した実際の光回路（1.31μmと1.55μmの波長フィルタ）の屈折率分布を説明するための図、

20 図37A～37Cは、実施例17における、光回路の作製手順を説明するための図、

図38は、高屈折率層 Δ_2 をエッチング除去した領域を「低屈折率領域」、高屈折率層 Δ_2 をエッチング除去せずに残存させた領域を「高屈折率領域」とする光回路の構成を説明するための図、

25 図39は、実施例17におけるパラメータ調整のための計算例を説明するための図、

図40は、実施例17の光回路である1.31/1.55μmWDM回路の特性（透過損失の波長依存性）を説明するための図、

図41Aおよび図41Bは、実施例18～1の光回路の製造

方法を説明するための図、

図 4 2 A および図 4 2 B は、実施例 18-2 の光回路の製造方法を説明するための図、

5 図 4 3 A ~ 4 3 D は、実施例 18-3 の光回路の製造方法を説明するための図、

図 4 4 A および図 4 4 B は、実施例 18-4 の光回路の製造方法を説明するための図、

図 4 5 A ~ 4 5 C は、実施例 18-5 の光回路の屈折率分布の様子を説明するための導波路断面図、

10 図 4 6 は、図 4 5 A ~ 4 5 C で示した構造を有する、 $1.31 \mu\text{m} / 1.55 \mu\text{m}$ の (1×2) 分岐回路の各々の損失特性(透過率)を説明するための図、

図 4 7 A ~ 4 7 C は、実施例 19 の光回路の構成を説明するための概略図、

15 図 4 8 A ~ 4 8 C は、実施例 20 の光回路の構成を説明するための断面図、

図 4 9 は、実施例 21 の光回路の導波路部分の断面図、

図 5 0 A ~ 5 0 C は、実施例 22 の光回路のサブピクセルの例を示す上面図、

20 図 5 1 A は、実施例 23 における、基板に対して水平な方向に屈折率が変化する構造を有する導波路の屈折率分布の概念図、

図 5 1 B は、実施例 23 の屈折率分布中に平面波を伝搬させた際の反射減衰の様子を説明するための図、

25 図 5 2 A は、ピクセル形状を円形とした場合の単位ピクセルにおける有効屈折率分布の様子を説明するための概念図、

図 5 2 B および図 5 2 C は、円形ピクセルを用いて構成した回路の一部の上面概念図、

図 5 3 は、ピクセル形状を蜂の巣状とした場合のピクセル配列の様子を説明するための図、

図 5 4 は、「準周期構造」と呼ばれる不完全周期構造を説明するための図、

図 5 5 は、相互一斉配信・一斉受信構成とした光回路の構成例を説明するための図、

5 図 5 6 は、図 5 5 の光回路の各ポート間での信号の流れを模式化した図、

図 5 7 は、図 5 6 で模式化して示した各ポート間での信号の流れを、論理的な信号の流れを崩さずに変形した様子を説明するための図、

10 図 5 8 は、不均等分配回路を用いた通信網の概念図、

図 5 9 は、不均等分配回路の応用概念図、

図 6 0 A および図 6 0 B は、アレイ導波路回折格子の性質を説明するための図、

15 図 6 1 は、出力スポット中心位置と波長との関係を説明するための図、

図 6 2 は、実施例 2 7 における光回路の構成を説明するための図、

図 6 3 は、フィールド形状としてガウス関数を仮定した場合の、中心位置の移動の様子を説明するための図、

20 図 6 4 A は、従来構成の導波路からの出射フィールドの等位相面の様子を説明するための図、

図 6 4 B は、本発明の回路構成の導波路からの出射フィールドの等位相面の様子を説明するための図、

25 図 6 5 は、比屈折率差 1.5% の石英系の平面光波回路技術で作製したホログラフィック波動伝達媒体によりスポット径を基板水平方向のみ整形したもののが近視野像の基板面に垂直な方向の断面図、

図 6 6 は、図 2 A に示した従来構成の回路に設けられているパラボラ導波路内のダブルピークのフィールド分布を説明する

ための図、

図 6 7 A～6 7 E は、本発明の低分散アレイ導波路格子型光合分波回路の製造プロセスを説明するための図、

図 6 8 は、パスバンド拡大アレイ導波路格子型光合分波回路
5 のスラブ導波路に接続される入力導波路構造（散乱点配置）の例を説明するための図、

図 6 9 は、図 6 8 に示した散乱点配置を有する入力導波路から出射される光フィールドの分布（振幅および位相）の計算結果を説明するための図、

10 図 7 0 は、実施例の入力導波路を用いてチャネル間隔 1 0 0 GHz のアレイ導波路格子型光合分波回路を構成し、この回路のパスバンド拡大化効果と低波長分散化効果を検証した結果を説明するための図である。

発明の詳細な説明

15 以下、図面を参照して本発明の実施の形態について説明する。なお、各図面において同様の機能を有する箇所には同一の符号を付し、説明の重複は省略する。また、入力光と入力ポート、および、出力光と出力ポート、に同じ符号を用いる場合があり得る。

20 （基本概念：本発明の波動伝達媒体の基本概念）

以下に、本発明の波動伝達媒体に関する基本的概念について説明するが、この説明に際しては簡略化のために、波動伝達媒体中を伝搬する「波動」は「光」であり、波動伝達媒体は光回路として用いられているものと仮定する。しかしながら、本発明が基礎とする理論は、一般の波動方程式に基づいて、媒質の特性を指定するものであり、一般の波動においても原理的に成り立ち得るものである。よって、本発明は、広義の「電磁波」を多重散乱により波動伝達させ得る媒体一般に応用可能である

のみならず、多体効果を無視できる電子波または巨視的にコヒーレンスを有する電子波にも適用可能である。よって、以下ではレーザ光のようなコヒーレンスを有する波動信号を光信号として記すが、波動信号には光信号の他に電磁波や電子波による信号をも含み得る。

また、本発明の波動伝達媒体は、単に狭義の光回路としてのみならず、分波器や合波器などのほか、ホログラフィックフィルタやホログラフィックレンズなどのホログラフィック光学素子の構成要素としても広範な利用が可能である。従って、本明細書中で用いられる「光回路」という文言は、本発明の波動伝達媒体の特性の理解の容易化のために用いられるものであり、波動伝達媒体そのもの（若しくは一般的な導波回路）をも意味し得るものと解釈できる。

また、以下の説明では「屈折率」によって波動伝達媒質の性質を規定しているが、「屈折率」とはその文言の定義の通り一般的な平面状の波動の伝搬において波動を屈折させる割合（平面波の方向を偏向させる割合）を意味するものであり、波動信号に対する媒体の性質を規定するものである。例えば、光信号の場合は主に誘電率であり、電子波信号の場合は主に電界もしくは磁界によって物理的に規定される。

さらに、本発明の波動伝達媒体は「ホログラフィック」波動伝達媒体とも言い換えることが可能であるが、この「ホログラフィック」波動伝達媒体という意味は、波動伝達媒体による回路全体での大域的なレベルでのホログラフィックな制御が、局所的なホログラフィック制御とその集合（制御された多重散乱）により実現されているという点にある。より具体的には、本発明の波動伝達媒体とは、コヒーレントな光のパターンを入力

して所望の光のパターンとして出力させるために、この媒体中を伝搬する順伝搬光と逆伝搬光の位相差が媒体中の何れの場所においても小さくなるように屈折率を配置し、局所的なレベルでのホログラフィックな制御を多重に繰り返すことにより、大域的なホログラフィック制御を実現するものである。
5

図 5 A～C は、本発明の波動伝達媒体の基礎となる基本概念と基本構造とを説明するための図である。まず、図 5 A を参照して用語の説明をする。図 5 A 中の 1 は光回路基板であり、1-1 は本発明の波動伝達媒体により構成される光回路の設計領域である。光回路の一方の端面は入力光 3-1 が入射する入射面 2-1 であり、この入力光 3-1 は波動伝達媒体で構成された空間的な屈折率分布を有する光回路中を多重散乱しながら伝搬し、他方の端面である出射面 2-2 から出力光 3-2 として出力される。なお、本実施例では、波動伝達媒体は誘電体からなるものと仮定し、空間的な屈折率分布はこの媒体を構成している誘電体の局所的な屈折率を後述する理論に基づいて設定することにより実現されるものとする。
10
15

入力光 3-1 が形成している「場」（入力フィールド）は、光回路を構成する波動伝達媒体の屈折率の空間的分布に応じて変調され、出力光 3-2 の形成する「場」（出力フィールド）に変換される。換言すれば、本発明の波動伝達媒体は、その空間的な屈折率分布に応じて入力フィールドと出力フィールドとを相関づけるための（電磁）フィールド変換手段である。なお、これらの入力フィールドおよび出力フィールドに対して、光回路中での伝搬方向（図中 z 軸方向）に垂直な断面（図中 x 軸に沿う断面）における光のフィールドをその場所 (x, z) における（順）伝搬像（伝搬フィールドあるいは伝搬光）と呼ぶ
20
25

(図 5 B 参照)。図 5 A 中の座標 z は光の伝搬方向の座標 ($z = 0$ が入射面、 $z = z_e$ が反射面) であり、座標 x は光の伝搬方向に対する横方向の座標である。

ここで、「フィールド」とは、一般に電磁場（電磁界）あるいは電磁場のベクトルポテンシャル場と呼ばれるものを意味している。本実施例の場合の電磁場の制御は、光回路中に設けられた空間的な屈折率分布、すなわち誘電率の分布を考えることに相当する。誘電率はテンソルとして与えられるが、通常は偏光状態間の遷移はそれほど大きくないので、電磁場の 1 成分のみを対象としてスカラー波近似しても良い近似となる。そこで、本明細書では電磁場を複素スカラー波として扱う。なお、光の「状態」には、エネルギー状態（波長）と偏光状態とがあるため、「フィールド」を光の状態を表現するものとして用いる場合には、光の波長と偏光状態をも包含し得ることとなる。

また、通常、伝搬光の増幅や減衰を生じさせない光回路では、屈折率の空間的分布を決めると、焦点以外の入力光 3-1 の像（入力フィールド）は、出力光 3-2 の像（出力フィールド）に対して一意的に定まる。このような、反射面 2-2 側から入射面 2-1 側へと向かう光のフィールドを、逆伝搬像（逆伝搬フィールドあるいは逆伝搬光）と呼ぶ（図 5 C 参照）。このような逆伝搬像は光回路中の場所ごとに定義することができる。すなわち、光回路中の任意の場所における光のフィールドを考えたとき、その場所を仮想的な「入力光」の出射点として考えれば、上記と同様に出力光 3-2 の像に対して、その場所での逆伝搬像を考えることができる。このように、光回路中の各場所ごとに逆伝搬像が定義できる。ここで特に、单一の光回路において、反射フィールドが入射フィールドの伝搬フィール

ドとなっている場合には、光回路の任意の点での伝搬フィールドと逆伝搬フィールドとは一致する。なお、フィールドは一般には対象とする空間全体の上の関数であるが、「入射フィールド」あるいは「出射フィールド」という場合は、入射面あるいは出射面におけるフィールドの断面を意味している。また、「フィールド分布」という場合でも、ある特定の断面に関して議論を行う場合にはその断面についてのフィールドの断面を意味している。

屈折率分布の決定方法を説明するためには記号を用いるほうが見通しがよいので、各量を表すために以下のようない記号を用いることとする。なお、本発明で対象とされる光（フィールド）は単一状態の光には限定されないので、複数の状態の光が重畳された光をも対象とされ得るべく、個々の状態の光にインデックス j を充てて一般的に表記する。

15 $\psi^j(x)$: j 番目の入射フィールド（複素ベクトル値関数であり、入射面において設定する強度分布および位相の分布、ならびに、波長および偏波により規定される）。

20 $\phi^j(x)$: j 番目の出射フィールド（複素ベクトル値関数であり、出射面において設定する強度分布および位相分布、ならびに、波長および偏波により規定される）。

なお、 $\psi^j(x)$ および $\phi^j(x)$ は、回路中で強度增幅や波長変換や偏波変換が行われない限り、光強度の総和は同じ（あるいは無視できる程度の損失）であり、それらの波長も偏波も同じである。したがって、

25 $\{\psi^j(x), \phi^j(x)\}$: 入出力ペア（入出力のフィールドの組み）。

は、入射面および出射面における、強度分布および位相分布な

らびに波長および偏波により規定される。

{ n_q } : 屈折率分布（光回路設計領域全体の値の組）。

与えられた入射フィールドおよび出射フィールドに対して屈折率分布をひとつ与えたときに光のフィールドが決まるので、
5 q 番目の繰り返し演算で与えられる屈折率分布全体に対するフィールドを考える必要がある。そこで、(x, z)を不定変数として屈折率分布全体を $n_q(x, z)$ と表しても良いが、場所 (x, z) における屈折率の値 $n_q(x, z)$ と区別するために、屈折率分布全体に対しては { n_q } と表す。

10 n_{core} : 光導波路におけるコア部分のような、周囲の屈折率に対して高い屈折率の値を示す記号。

n_{clad} : 光導波路におけるクラッド部分のような、 n_{core} に対して低い屈折率の値を示す記号。

15 $\psi^j(z, x, \{n_q\})$: j 番目の入射フィールド $\psi^j(x)$ を屈折率分布 { n_q } 中を z まで伝搬させたときの、場所 (x, z) におけるフィールドの値。

$\phi^j(z, x, \{n_q\})$: j 番目の出射フィールド $\phi^j(x)$ を屈折率分布 { n_q } 中を z まで逆伝搬させたときの、場所 (x, z) におけるフィールドの値。

20 本実施例の屈折率分布の決定方法は、すべての j について $\psi^j(z_e, x, \{n_q\}) = \phi^j(x)$ あるいはそれに近い状態となるように { n_q } を求める方法を与えるものである。

「入力ポート」および「出力ポート」とは、入射端面および出射端面におけるフィールドの集中した「領域」で、たとえば
25 、その部分に光ファイバを接続することにより、光強度をファイバに伝搬できるような領域である。ここで、フィールドの強度分布および位相分布は j 番目のものと k 番目のものとで異なる

るよう設計可能であるので、入射端面および出射端面に複数のポートを設けることが可能である。さらに、入射フィールドと出射フィールドの組を考えた場合、その間の伝搬により発生する位相が、光の周波数によって異なるので、周波数が異なる
5 光（すなわち波長の異なる光）については、位相を含めたフィールド形状が同じであるか直交しているかの如何にかかわらず、異なるポートとして設定することが可能である。符号としては、入射ポート側にはアルファベットの大文字 A、B、C、・・・を充て、出射ポート側にはアルファベットの小文字 a、b
10 、c、・・・を充てるものとする。

その他、 α 、 γ 、 g や w は数値計算上の適当な係数であり、それらの程度については適宜文章中に示すこととするが、たとえば、通常の数値流体力学等で用いられる「スキームの安定性の議論」にしたがって、実際の数値計算では僅かに調整される
15 べきものである。

伝搬方向は z 、伝搬方向に対して垂直な方向は x で表し、入射面 2-1 での z の値を 0、出射面 2-2 での z の値を z_e とする。後述するように、対象とする区別可能な光の状態に順次番号をつける。このとき、 j 番目の入射フィールドと、それに
20 対応し出射させたい所望の出射フィールドをそれぞれ $\psi^j(x)$ および $\phi^j(x)$ とする。ここで、電磁界は実数ベクトル値の場で、かつ波長と偏光状態をパラメータとしてもつものとするが、その成分の値を一般な数学的取扱いが容易な複素数で表示して電磁波の解を表記する。また、以下の計算においては、フィールド全体の強度は 1 に規格化されているものとする。なお、 j 番目の入射フィールドや出射フィールドとは、フィールドの強度分布と位相分布あるいは波長や偏光により互いに区別される属
25

性を有する光の組の要素に対して適当に順番をつけたものである。

図 5 B および図 5 C に示すように、 j 番目の入射フィールド $\psi^j(x)$ および出力フィールド $\phi^j(x)$ に対し、伝搬フィールドと逆伝搬フィールドをそれぞれ場所の複素ベクトル値関数として、 $\psi^j(z, x, \{n\})$ および $\phi^j(z, x, \{n\})$ と表記する。これらの関数の値は屈折率分布 $\{n\}$ により変化するため、屈折率分布 $\{n\}$ がパラメータとなる。記号の定義により、 $\psi^j(x) = \psi^j(0, x, \{n\})$ および、 $\phi^j(x) = \phi^j(z_e, x, \{n\})$ となる。これらの関数の値は、入射フィールド $\psi^j(x)$ と出射フィールド $\phi^j(x)$ および屈折率分布 $\{n\}$ が与えられれば、ビーム伝搬法などの公知の手法により容易に計算することができる。これらの各フィールドの様子をより具体的な例を用いて説明すると以下のようになる。

図 6 は、従来のアレイ導波路格子回路の構成例を説明するための図で、光回路設計領域 1 - 1 には、2 つのスター カプラ（光合分波器）4 - 1 および 4 - 2 間に設けられたアレイ導波路 5 と、このアレイ導波路 5 の中央部に設けられた波長板 6 とが形成されている。この図に示したような波長多重通信における $1 \times N$ 波長分波器（ N は波長の数）を考えると、たとえば、1 つの入力ポート 3 - 1 に対して、ほぼ同様なフィールド強度と位相分布をもつ入射フィールドで、波長 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N$ の異なる N 個の信号に番号をつけ、その j 番目の波長の光を所望の個別の出力ポート 3 - 2 から出力させる。このとき、光を分波するためには、導波路の出射面の断面における j 番目の波長の光の強度および位相の分布は、独立な出射フィールドパターンとなっていることが求められ、これを j 番目の出射フィールドと呼ぶ。分波された光を光ファイバへ出力させる場合

を想定すれば、出力されるべきフィールドパターンは、独立した各々の出射フィールドが空間的に異なる場所となるフィールドの組となる。なお、与えられた入射フィールドの組を所望の出射フィールドで出力する光回路を構成するためには、入射フィールドあるいは出射フィールドのパターンは、その強度および位相の分布が j 番目と k 番目とで同一であってもよい。

以下に、空間的な屈折率分布を決定するため的一般的なアルゴリズムを説明する。

図 7 は本発明の波動伝達媒体の空間的な屈折率分布を決定するための計算手順を説明するためのフローチャートである。この計算は繰り返し実行されるものであるので、繰り返し回数を q で表し、 $(q - 1)$ 番目まで計算が実行されているときの q 番目の計算の様子が図示されている。

$(q - 1)$ 番目の計算によって得られた屈折率分布 $\{n_{q-1}\}$ をもとに、各 j 番目の入射フィールド $\psi^j(x)$ および出射フィールド $\phi^j(x)$ について伝搬フィールドと逆伝搬フィールドとを数值計算により求め、その結果を各々、 $\psi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ および $\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ と表記する（ステップ S 220）。

これらの結果をもとに、各場所 (z, x) における屈折率 $n_q(z, x)$ を、次式により求める（ステップ S 240）。

$$n_q(z, x) = n_{q-1}(z, x) - \alpha \sum_j \text{Im}[\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})^* \cdot \psi^j(z, x, \{n_{q-1}\})] \quad \dots \quad (1)$$

ここで、右辺第 2 項中の記号「・」は内積演算を意味し、 $\text{Im}[]$ は [] 内のフィールド内積演算結果の虚数成分を意味する。なお、記号「*」は複素共役である。係数 α は $n_q(z, x)$ の数分の 1 以下の値をさらにフィールドの組の数で割った値であり、正の小さな値である。 Σ_j はインデックス j について和をとるという

意味である。

ステップ S 220 と S 240 を繰り返し、伝搬フィールドの出射面における値 $\psi^i(z_e, x, \{n\})$ と出射フィールド $\phi^i(x)$ との差の絶対値が所望の誤差 d ; よりも小さくなると (ステップ S 5 230 : YES) 計算が終了する。

上式 (1) のように屈折率 $n_q(z, x)$ を求める根拠は下記のとおりであり、屈折率分布を最急降下法により求めることに対応している。

まず、屈折率分布 $\{n_{q-1}\}$ により入射光が伝搬したフィールド $\psi^i(z_e, x, \{n_{q-1}\})$ と、最終的に得たい出力 $\phi^i(x)$ との差が最小となるためには、残差 $R = \sum_j |\phi^i(x) - \psi^i(z_e, x, \{n_{q-1}\})|^2$ が最小となればよい。なお、 $\phi^i(x)$ などは x の関数であることを表しており、特定の x の座標を意味するわけではない。また、各ペアごとに重みをつけてもよいが簡単のため全て同じ重みで和をとることとする。

ここでは、光のフィールドの重ね合わせが可能な範囲で考えており、フィールドの重なり積分により内積が定義される。この光フィールドの重ね合わせは有限のエネルギーをもち、かつ、取り扱われるフィールドは空間的に有限な範囲に限定される。
したがって、ここでいうフィールドはヒルベルト空間を形成し、光の伝搬は以下の性質を有するユニタリ変換として定義される。

具体的には、 z_0 から z までのユニタリ変換演算子 U として、

$$\psi^i(z, x, \{n_{q-1}\}) = U(z, z_0, \{n_{q-1}\}) \psi^i(z_0, x, \{n_{q-1}\}) \quad \dots (2)$$

が成り立ち、ここで、反射が無視できる程度であるとすると、伝搬過程の加法性から、

$$U(z, z_0, \{n_{q-1}\}) = U(z, z_1, \{n_{q-1}\}) U(z_1, z_0, \{n_{q-1}\}) \dots \quad (3)$$

となる。

さらに、重なり積分により定義される内積に対してユニタリ
性を有するから、

$$\begin{aligned} U(z, z_0, \{n_{q-1}\})^* U(z, z_0, \{n_{q-1}\}) \\ = U(z, z_0, \{n_{q-1}\})^{-1} U(z, z_0, \{n_{q-1}\}) \\ = |U(z, z_0, \{n_{q-1}\})|^2 = 1 \end{aligned} \quad \dots \quad (4)$$

となる。ここで、 $U(z, z_0, \{n_{q-1}\})^*$ は $U(z, z_0, \{n_{q-1}\})$ の自己隨
伴演算子である。また、 $U(z, z_0, \{n_{q-1}\})^{-1}$ は $U(z, z_0, \{n_{q-1}\})$
の逆演算子、つまり、逆方向の伝搬を与える演算子である。

z' と z の差 ($|z' - z|$) が十分小さい範囲において、
 $U(z', z, \{n_{q-1}\})$ はビーム伝搬法などにおける丁度 1 ステップ
分の変換をもたらす行列であると考えればよく、適当に伝搬方
向を分割してこの演算を繰り返したものが $U(z, z_0, \{n_{q-1}\})$ な
どであると考えればよい。

これらの結果を用いて残差 R を書き換えると、

$$\begin{aligned} R &= \sum_j |\phi^j(x) - U(z_e, z', \{n_{q-1}\}) U(z', 0, \{n_{q-1}\}) \psi^j(x)|^2 \\ &= \sum_j |U(z_e, z', \{n_{q-1}\})^{-1} \phi^j(x) - U(z', 0, \{n_{q-1}\}) \psi^j(x)|^2 \\ &= \sum_j |U(z_e, z', \{n_{q-1}\})^{-1} \phi^j(x) - U(z', z, \{n_{q-1}\}) U(z, 0, \{n_{q-1}\}) \psi^j(x)|^2 \\ &= \sum_j |\phi^j(z', x, \{n_{q-1}\}) - U(z', z, \{n_{q-1}\}) \psi^j(z, x, \{n_{q-1}\})|^2 \end{aligned} \quad \dots \quad (5)$$

となる。

$|z' - z| \rightarrow 0$ の極限においては、特定の x 座標の場所 x

における $U(z', z, \{n_{q-1}\})$ の変化 ($\delta_x U(z', z, \{n_{q-1}\})$) は、同じく特定の x 座標の場所 x における $n_{q-1}(z, x)$ の変化 ($\delta_x n_{q-1}(z, x)$) と、

$$\delta_x U(z', z, \{n_{q-1}\}) = -i\kappa \delta_x n_{q-1}(z, x) \quad \dots \quad (6)$$

5 の関係を有する。なお、 κ は概ね真空中の伝搬定数程度の値で正数の適当な係数であるが、計算上他の係数と組み合わせるためにここでは詳しく議論しない。

以上の結果より、特定の x 座標の場所 x における残差 R の変化 ($\delta_x R$) として、

$$\begin{aligned} 10 \quad \delta_x R &= \sum_j \{-i\kappa \delta n_{q-1}(z, x) \phi^j(z', x, \{n_{q-1}\})^* \psi^j(z, x, \{n_{q-1}\}) \\ &\quad + c.c.\} \\ &= 2\kappa \delta n_{q-1}(z, x) \operatorname{Im} \sum_j \phi^j(z', x, \{n_{q-1}\})^* \psi^j(z, x, \{n_{q-1}\}) \\ &\quad \dots \quad (7) \end{aligned}$$

が得られる。

15 ここで、

$$\begin{aligned} \delta n_{q-1}(z, x) &= -\alpha \operatorname{Im} \sum_j \phi^j(z', x, \{n_{q-1}\})^* \psi^j(z, x, \{n_{q-1}\}) \\ &\quad (\alpha > 0) \\ &\quad \dots \quad (8) \end{aligned}$$

とすれば $\delta_x R < 0$ となり、この方向に変化させていけば極小値に向かうことになる。これが上式 (1) の方向に屈折率分布を変化させる理由である。

以上の計算では、屈折率分布の初期値 $\{n_0\}$ は適当に設定すればよいが、この初期値 $\{n_0\}$ が予想される屈折率分布に近ければ、それだけ計算の収束は早くなる (ステップ S 2 0 0)。

25 また、各 j について $\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ および $\psi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ を計算するにあたっては、パラレルに計算が可能な計算機の場合は、 j ごと (すなわち、 $\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ および $\psi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$) を並列に計算することができる。

$\{n_{q-1}\}$ ごと)に計算すればよいので、クラスタシステム等を利用して計算の効率化を図ることができる(ステップS220)。また、比較的少ないメモリで計算機が構成されている場合は、式(1)のインデックスjについての和の部分で、各qで適5当なjを選び、その分の $\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ および $\psi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ のみを計算して、以降の計算を繰り返すことも可能である(ステップS220)。

以上の演算において、 $\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ の値と $\psi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ の値とが近い場合には、式(1)中の $I_m[\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\}) + \psi^j(z, x, \{n_{q-1}\})]$ は位相差に対応する値となり、この値を10減少させることで所望の出力を得ることが可能である。

図8は上述した計算手順の理解を容易にするために、波動伝達媒体中でのフィールドの様子の一例を示した図である。この図を例に説明すると、本発明の波動伝達媒体からなる光回路設計領域1-1の任意の位置(x, z)において、伝搬する光の波面15に対して概ね平行でかつ概ね無視できる幅(Δz)を持った微小領域を仮定し、この微小領域の断面をXとする。なお、ここで「概ね無視できる幅」とは、屈折率分布をもたない媒体中を光がその距離 Δz だけ伝搬したときに、伝搬光の位相がもとの波面と概ね同一であるような距離を意味している。断面Xよりも入射面2-1側にある光回路をA回路、出射面2-2側にある光回路をB回路とすると、断面XはA回路とB回路の界面となる。

いま、所望の各入出力の組を考えて、各組に $j = 1$ からNと25番号を付け、j番目の組の入射フィールド $\psi^j(x)$ と出射フィールド $\phi^j(x)$ を仮定する。A回路に入射フィールド $\psi^j(x)$ を入力して伝搬させた場合の、界面Xにおける、導波光、回折光およ

び散乱光の各々のフィールドの和はフィールド $\psi^i(z_x, x, \{n_q\})$ である。また、A回路中を伝搬する光の位相共役光として、出射フィールド $\phi^i(x)$ を A回路とは逆方向に B回路中を伝搬させた導波光、回折光および散乱光の各々のフィールドの和はフィールド $\phi^i(z_x + \Delta z, x, \{n_q\})$ である。これらのフィールド $\psi^i(z_x, x, \{n_q\})$ および $\phi^i(z_x + \Delta z, x, \{n_q\})$ の位相差を、各組毎に平均（または重み付け平均）した値 P を求め、この位相差 P を、所望の屈折率の範囲において可能な限り打ち消すように界面 X 上での屈折率分布を決定する。このような屈折率分布 10 は界面 X 每に定まるから、界面 X の位置を z 軸上で 0（入射面）から z_e （出射面）まで変化させて演算を実行することすれば、波動伝達媒体全体の屈折率分布が定まることとなる。

本発明における屈折率の空間的分布の決定は、波動伝達媒体に仮想的メッシュを定め、このメッシュによって画定される微小領域（ピクセル）の屈折率を各ピクセルごとに決定するものとも言い換えることが可能である。このような局所的な屈折率は、原理的には、その場所ごとに任意の（所望の）値とすることが可能であるが、基も単純な系は、低屈折率 (n_L) を有するピクセルと高屈折率 (n_H) を有するピクセルのみからなる系であり、これら 2 種のピクセルの空間的分布により全体的な屈折率分布が決定される。この場合、媒体中の低屈折率ピクセルが存在する場所を高屈折率ピクセルの空隙として観念したり、逆に、高屈折率ピクセルが存在する場所を低屈折率ピクセルの空隙として観念したりすることが可能である。すなわち、本発明の波動伝達媒体とは、均一な屈折率を有する媒体中の所望の場所（ピクセル）をこれとは異なる屈折率のピクセルで置換したものと表現することも可能である。

上述した屈折率分布決定のための演算内容を要約すると次のようになる。すなわち、波動をホログラフィックに伝達させ得る媒体（光の場合には誘電体）に入力ポートと出力ポートとを設け、入力ポートから入射した伝搬光のフィールド分布1（順伝搬光）と、入力ポートから入射した光信号が出力ポートから出力される際に期待される出力フィールドを出力ポート側から逆伝搬させた位相共役光のフィールド分布2（逆伝搬光）と、を数値計算により求める。そして、これらのフィールド分布1および2をもとに、伝搬光と逆伝搬光の各点(x, z)における位相差をなくすように、媒体中での空間的な屈折率分布を求める。なお、このような屈折率分布を得るための方法として最急降下法を採用すれば、各点の屈折率を変数として最急降下法により得られる方向に屈折率を変化させることにより、屈折率を式(1)のように変化させることで上記2つのフィールド間の差を減少させることが可能となる。そして、このような波動伝達媒体を、入力ポートから入射した光を所望の出力ポートに出射させる光部品に応用すれば、媒体内で生じる伝搬波同士の多重散乱による干渉現象により、実効的な光路長が長くなり、緩やかな屈折率変化（分布）でも充分に高い光信号制御性を有する光回路を構成することが可能となる。

以下に実施例により、上述の波動伝達媒体を用いて構成した光回路について説明する。なお、以下の実施形態においては、特に断らない場合は、基板上に形成した埋め込み型石英系光導波路と同様の屈折率分布を、基板からの高さ方向に有する光回路であり、その光回路の厚み（層厚）は単一モード光導波路とほぼ同等のものであるものとする。さらに、基板にはシリコン基板を用い、その上に石英に添加物を加えて屈折率を調整した膜を堆積し、半導体作製工程で用いられる微細加工技術により、

光回路をパターン化するものである。したがって、光回路パターンは2次元的であり、基板に対して水平方向に光回路としての機能を発現するようにパターン形成される。

しかしながら、高屈折率部分と低屈折率部分とからなる回路を基板面内に2次元的に展開した場合に、単純に、低屈折率部分を光導波路のコアに相当する部分が全くないものをしてしまうと、光回路における損失が発生してしまうこととなる。したがって、光回路としては2次元的であっても基板高さ方向をも考慮して光回路が設計されるべきであることはいうまでもない。

上述したように、本発明の光回路の作製には半導体微細加工技術が適用されるので、特に断らない限りは、光回路の屈折率分布は2値化されたパターンとなる。また、基板面内におけるパターンにおいて、屈折率が高い部分を高屈折率部分、低い部分を低屈折率部分と呼ぶ。また、屈折率調整された膜の堆積により屈折率変化が与えられているので、基板高さ方向での屈折率の高い部分を高屈折率層、低い部分を低屈折率層と呼ぶ。なお、特に問題がない場合には、光導波路の構造の慣例に従って、高屈折率部分を「コア」、低屈折率部分を「クラッド」と呼ぶ。さらに、基板水平面内のパターンについて議論する場合には、パターンの基本単位を「ピクセル」とよび、この「ピクセル」がブロック状に組み合わされることでマクロなパターンが形成される。このようなピクセルは、最も単純な場合には、仮想的に設けられたメッシュにより規定されるピクセルサイズの周期の格子点上に配置され、高屈折率部分と低屈折率部分とによれ25 パターンが形成される。ただし、これらのピクセルを格子点上に配置する必要は必ずしもなく、所望の屈折率分布を得るために意図的に格子点上からずらして配置するようにしてもよい。

(実施例1)

いわゆるステップインデクス型の光回路の場合には、屈折率の取り得る値が限られているため、上述した式（1）に基づいて光回路が設計可能か否かは自明ではない。しかし、屈折率の取り得る値が限られている場合であっても、局所的な屈折率の調整を繰り返すことにより、光の位相を大域的に調整することが可能である。したがって、光回路を構成する誘電体の屈折率の上限値とこの上限値に至る有限個の屈折率値とを有するステップ状の屈折率分布を仮定し、これらの屈折率を制限値として光回路の屈折率分布を計算することで光回路を設計することは可能である。本実施例ではこのような考えに基づいて光回路を設計する。

本実施例においてはこれを、ステップインデクス型平面光導波路と同様の構造の光導波路であって、かつ、その導波路のコアが光回路設計領域においてドット状にパターン化されている構造を有する光導波路に適応し、 $1.31\mu\text{m}$ と $1.55\mu\text{m}$ の波長分割フィルタを設計した。

本実施例では、石英の光導波路が想定されている。また、屈折率の空間的分布を計算するにあたっては、コア（高屈折率部分）の屈折率とクラッド（低屈折率部分）の屈折率の2種類のみを考えることとし、これらの2種類の屈折率を光回路設計領域内で分布させて得られる屈折率分布を計算することとした。

また、図7を用いて説明した屈折率分布算出のアルゴリズムでは、パラメータである屈折率値は自由な値を取り得るものとしているが、ここでは、次式（9）で与えられる v_q なる値を計算し、この v_q 値から次式（10）および（11）により屈折率を求めることとした。

$$v_q(z, x) = v_{q-1}(z, x) - \alpha \sum_j \operatorname{Im}[\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})^* \cdot \psi^j(z, x,$$

$$\{n_{q-1}\})] \dots \quad (9)$$

$$v_q(z, x) > (n_{core} + n_{clad})/2 \text{ のときは } n_q(z, x) = n_{core} \\ \dots \quad (10)$$

$$v_q(z, x) < (n_{core} + n_{clad})/2 \text{ のときは } n_q(z, x) = n_{clad} \\ \dots \quad (11)$$

5

10

15

20

25

ここで、 n_{core} はコアに相当する屈折率、 n_{clad} はクラッドに相当する屈折率である。したがって、光回路設計領域内での屈折率分布は、これらの2種類の屈折率を空間的に分布させて得られることになる。なお、一般には、 $n_{core} > n_{clad}$ の関係が成立する。このような計算によっても、以下に示すように、十分に所望の光出力を得ることが可能な光導波路を設計することができる。

さらに、簡単化のために、上記2種類の屈折率のうち、コアのパターンに相当する屈折率(n_{core})を有効屈折率とし、進行方向1次元、横方向1次元として計算した。

図9Aおよび図9Bは、本実施例における光回路設計の設定を説明するための図である。まず、入力ポート3-1から入力させた偏波多重された光を出力ポート3-2から出力させることとして屈折率分布を調整することにより、図9Aのように、波長 $1.31\mu m$ の入射フィールド $\psi^1(x)$ と出射フィールド $\phi^1(x)$ (すなわち、上記の記号で $j=1$)の組と、図9Bのように、波長 $1.55\mu m$ の入射フィールド $\psi^2(x)$ と出射フィールド $\phi^2(x)$ (すなわち、上記の記号で $j=2$)の組を設定した。フィールドは入射面2-1と出射面2-2の全域について定義されるものであるが、この図では理解の容易化のために、フィールド強度が集中している部分のみを図示している。このような入射/出射フィールドの組 $\{\psi^j(x), \phi^j(x)\}$ を、以降、出入力ペアと呼ぶ。

図10Aおよび図10Bは、本実施例による屈折率分布(図

10 A) と透過スペクトル (図 10 B) を説明するための図である。上記のアルゴリズムにしたがって屈折率を計算する約 20
5 0回の繰り返しにより、図 10 A に示した屈折率分布を有する光
回路が得られる。ここで、図中の光回路設計領域 (1 - 1) 内
の黒色部分 (1 - 1 1) はコアに相当する高屈折率部 (誘電体
多重散乱部) であり、黒色部以外の部分はクラッドに相当する
低屈折率部である。クラッドの屈折率としては石英ガラスの屈
折率を想定しており、コアの屈折率は、石英ガラスに対する比
屈折率が 1.5%だけ高い値を有するものとしている。また、光回
10 路のサイズは縦 $300 \mu\text{m}$ 、横 $140 \mu\text{m}$ である。

屈折率分布を求める際の計算に用いられたメッシュは 140×3
00 (= 42000) である。従って、屈折率分布のパラメータ数は 4
2000となるから、これらのパラメータを最適化する必要がある
。最急降下法を単純に適用して、これらの各々のパラメータに
15 つづつ数値微分を求めてパラメータを最適化する場合には、1 ステップ分の計算を実行するのに 42000 の光の伝
搬を計算する必要がある。これに対して、本実施例では 2 回の光
の伝搬を計算するだけで足りるため、実用上妨げとならない短
時間の計算で光回路の設計が可能となる。

20 このようにして設計された光回路の透過スペクトルは図 10
B のようになり、波長 $1.31 \mu\text{m}$ の光が出力ポート a から出力され
る一方、波長 $1.55 \mu\text{m}$ の光が出力ポート b から出力される特性を
示す。すなわち、波長による分波器が形成されていることがわ
かる。なお、図 9 A および図 9 B に図示した光の入力方向と出
25 力方向とを逆転させ、上記 2 つの波長の光の各々を出力ポート
a および b から入力しこれらの光を合波して入射面 2 - 1 から
出力させることも可能であるから、合波器としても動作させる

ことができる。つまり、本実施例で説明した光回路は、光の波長による合分波器としての作用を奏することが分かる。

ところで、光回路としての機能を担保するためには、光回路内を伝搬する光がその光回路内で十分に閉じ込められることが必要である。図 10 A に示した屈折率分布では、高屈折率部であるコアは光回路設計領域内でドット状に分布しており、基板の厚み方向での光の閉じ込めが不十分になることが懸念される。

そこで、高屈折率部を 2 つの高屈折率部（第 1 の高屈折率部と第 2 の高屈折率部）で構成することとし、この高屈折率部が低屈折率部で上下から挟まれている構造の光回路を想定し、その屈折率分布を求めた。

図 11 A は、平面光波回路状の屈折率分布を有し、かつ、基板垂直方向での光閉じ込め可能な光回路の断面概念図であり、この光回路の高屈折率部 1 - 1 1 は、2 つの高屈折率部（第 1 の高屈折率部 1 - 1 1 a と第 2 の高屈折率部 1 - 1 1 b）で構成され、第 2 の高屈折率部 1 - 1 1 b は第 1 の高屈折率部 1 - 1 1 a よりも高い屈折率を有している。そして、高屈折率部 1 - 1 1 が上下の低屈折率部 1 - 1 2 で挟まれて光回路が構成されている。なお、この光回路において所謂「コア」として作用するのは第 2 の高屈折率部 1 - 1 1 b であり、第 1 の高屈折率部 1 - 1 1 a は、このコア中を伝搬する光を基板の厚み方向（垂直方向）に閉じ込めるためのものである。なお、この図において、低屈折率部 1 - 1 2 と第 1 の高屈折率部 1 - 1 1 a の比屈折率差、および、第 1 の高屈折率部 1 - 1 1 a と第 2 の高屈折率部 1 - 1 1 b の比屈折率差は、各々 1.5% として計算を行っている。図 11 A の右側には光回路の垂直方向での有効屈折率

プロファイルが、下側には高屈折率部 1-1-1 における水平方向での有効屈折率プロファイルが示されている。

このような構造の光回路によれば、コアである第 2 の高屈折率部 1-1-1 b の周りに設けられた第 2 の高屈折率部 1-1-1
5 a によって、基板厚み方向での光閉じ込めが容易に実現できる。
。

このような光回路に光入出力部を設けるに際しては、第 1 の高屈折率部 1-1-1 a で光をガイドする場合（図 11B）と第 2 の高屈折率部 1-1-1 b で光をガイドする場合（図 11C）
10 とが考えられる。また、第 1 の高屈折率部 1-1-1 a および第 2 の高屈折率部 1-1-1 b の各々の形状を最適化したりこれらを組み合わせたりすることにより、フィールド径の調整を行って光ファイバとの光結合の最適化が可能となる。

なお、出力フィールドは複素数値で計算されるから、出力フィールドの位相を求めることが可能である。従って、例えば、上述の光回路と無反射コートを施した半導体光アンプとを組み合わせて外部共振器レーザを作製する場合などのように、光の位相の調整も必要とされる場合にも、上述の光フィールドの計算手順は適用可能である。
15

これまで説明してきた光フィールドの計算にはピーム伝搬法を用いたが、演算に用いるコンピュータのメモリ容量が十分な場合には時間領域差分法を用いて計算してもよい。一般に、ピーム伝搬法は直線的な方向への光出力を計算するため、出力ポートの位置が限定される。例えば、本実施例の場合には、入射面の対向面を出射面とした。これに対して、時間領域差分法を用いて計算すれば、出力ポートの位置は自由に選択可能となるから、急激な屈曲を有する光路を備えた構成の光回路などを容
20
25

易に設計することができる。このことは、以下の実施例においても同様である。また、このような回路を方向性結合器の組み合わせによって実現しようとすると、方向性結合器部分だけでも数百 μm の光回路部分を要することとなるのに対して、上述
5 の方法によれば数分の 1 度の大さきの光回路構成とすること
ができる小型化を図ることが可能となる。

(実施例 2)

本実施例は、実施例 1 で説明した光回路と同じ光回路を、以下のような屈折率分布の計算方法に基づいて設計したものである。
10 この概要を再度図 1 を参照して簡単に説明すると、先ず、適当な屈折率分布 $\{n\}$ を与えてこれに対応する入力光のフィールド分布 1 : $\psi^i(z, x, \{n\})$ を求め、出力ポートから出力される出力光として期待されるフィールドの逆伝搬光（フィールド分布 2 : $\phi^i(z, x, \{n\})$ ）を入射面 2-1 に向けて仮想的に伝搬
15 させながら逐次求める。

図 8 を例に説明すると、ある場所 $z=z_x$ でのフィールド分布 1 の断面 $\psi^i(z_x, x, \{n\})$ の位相とフィールド分布 2 の断面 $\phi^i(z_x + \Delta z, x, \{n\})$ の位相が互いに整合するように屈折率分布を変更し、変更後の屈折率分布を用いて、
20 $(z_x + \Delta z)$ から z_x までのフィールド分布 2 の断面 $\phi^i(z, x, \{n\})$ ($z = z_x + \Delta z \sim z_x$) を求め直す。 $(z_x - \Delta z)$ を改めて z_x として同じ操作を逐次的に繰り返す。フィールド分布 2 の断面が入射面 2-1 に達した時点で、今度は逆に、入力光のフィールド分布 1 の断面を伝搬方向に仮想的に伝播させ、上記と同様に、フィールド分布 1 の断面とフィールド分布 2 の断面とを位相整合させながら屈折率分布を逐
25 次決定し、フィールド分布 1 の断面が出射面 2-2 に達するまで計算を実行する。

この手順を 1 つのルーチンとして、再度このルーチンを繰返し、フィールド分布 2 およびフィールド分布 1 を相互に逆伝搬または順伝搬させながら屈折率分布を逐次改め直し、入射フィールド ψ^1 が出射面 2-2 まで伝搬した結果出力される出射フィールド $\psi^1(x)$ と、所望の出射フィールドとが、所望の誤差以下となるまで上記の計算を繰り返す。

後述するように、このような手順を採用することにより、光回路の設計に要する時間が短縮され、大規模光回路の設計も現実的な時間と手間の下で可能となる。

まず、アルゴリズムについて説明する。

図 12 は、本実施例の光回路設計のフローを簡単に示したフローチャートである。式(1)で用いた記号と同じ記号を用いて、

$$n_q(z+dz, x) = -\gamma \sum_j \arg[\phi^j(z+dz, x, \{n_{q-1}\})^* \cdot \psi^j(z, x, \{n_q\})] \quad \dots (1')$$

$$n_{q+1}(z-dz, x) = -\gamma \sum_j \arg[\phi^j(z, x, \{n_{q+1}\})^* \cdot \psi^j(z-dz, x, \{n_q\})] \quad \dots (1'')$$

とする。ここで、係数 γ は、 $(2k_0 dz)^{-1}$ 程度の値を入出力ペアの数で割ったものであり、 k_0 は真空中の波数で、考えている入力信号の平均の波数程度である。ここで、波数「程度」としている理由は、比有効屈折率程度の変化があるという意味である。

式(1')および式(1'')は、式(1)の $\text{Im} \sum_j \phi^j(z', x, \{n_{q-1}\})^* \psi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ が、極小点において丁度位相差がなくなるべきであることを意味しており、これをもとに $\arg[\phi^j(z', x, \{n_{q-1}\})^* \psi^j(z, x, \{n_{q-1}\})]$ が減少するように屈折率を配置することを意味している。特に、位相差が小さい場合は、振幅を除いて $\text{Im} \sum_j \phi^j(z', x, \{n_{q-1}\})^* \psi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ と、 $\arg[\phi^j(z', x, \{n_{q-1}\})^* \psi^j(z, x, \{n_{q-1}\})]$ の値が近づく。

z' , x , $\{n_{q-1}\})^*\psi^j(z, x, \{n_{q-1}\})]$ と、は等価になるので、 $\arg[\phi^j(z', x, \{n_{q-1}\})^*\psi^j(z, x, \{n_{q-1}\})]$ を $\text{Im} \sum_j \phi^j(z', x, \{n_{q-1}\})^*\psi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ としてもよく、これは場所ごとのフィールドの強度で重み付けして屈折率を変更することに対応する。以下では簡単のため $\arg[\phi^j(z', x, \{n_{q-1}\})^*\psi^j(z, x, \{n_{q-1}\})]$ を用いることとする。

式(1')の意味は、 $\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ が全域で与えられているとして、求めた $n_q(z, x)$ をもとに $\psi^j(z, x, \{n_q\})$ を求め（ステップ S 6 7 0）、この $\psi^j(z, x, \{n_q\})$ をもとに、さらに、座標 z から微小距離 dz だけ進んだ点 $(z+dz)$ において $n_q(z+dz, x)$ を決める（ステップ S 6 8 0）ということである（ステップ S 6 5 5）。ここで、記号「・」は内積演算を表し、 $\arg[]$ はその偏角で、記号「*」は複素共役を意味する。

また、式(1'')の意味は、 $\psi^j(z, x, \{n_q\})$ が全域で与えられているとして、求めた $n_{q+1}(z, x)$ をもとに $\phi^j(z, x, \{n_{q+1}\})$ を求め（ステップ S 6 2 0）、座標 z から dz だけ戻った点 $(z-dz)$ において $n_{q+1}(z-dz, x)$ を求める（ステップ S 6 3 0）ということである（ステップ S 6 0 5）。

式(1')の算出（ステップ S 6 5 5）と式(1'')の算出（ステップ S 6 0 5）を交互に繰り返す（ステップ S 6 9 7）ことにより屈折率分布の計算を計算終了（ステップ S 6 9 5：YES）まで実行する。

本実施例の計算においては、微小距離 dz でフィールド分布 1 の断面とフィールド分布 2 の断面とを位相整合をさせることとしており、実際の計算では周期の短い振動が発生してしまい結果として大きな計算誤差を生じることとなる。そこで、係数 γ に適当な稀有数 g をかけて、両者の積 $(g \cdot \gamma)$ が $(2k_0 dz)^{-1}$

の数分の 1 以下の値となるようにする。また、フィールドの位置についても、完全な $z+dz$ ではなく、その途中の値としたり、あるいは、 $n_q(z+dz, x)$ が位置 z と位置 $z+2dz$ の屈折率の中心値となる位置 $(z+w\Delta z)$ ($0 \leq w \leq 2$) としたりする。このような工夫により、

$$\begin{aligned} n_q(z+dz, x) &= (1-g)n_{q-1}(z+dz, x) \\ &\quad - g \gamma \sum_j \arg [\phi^j(z+w\Delta z, x, \{n_{q-1}\})^* \cdot \psi^j(z, x, \{n_q\})] \quad \dots (1') \\ n_{q+1}(z-dz, x) &= (1-g)n_q(z-dz, x) \\ &\quad - g \gamma \sum_j \arg [\phi^j(z, x, \{n_{q+1}\})^* \cdot \psi^j(z-w\Delta z, x, \{n_q\})] \quad \dots (1'') \end{aligned}$$

として上式 (1') および (1'') を修正する。そして、稀有数 g を $0 < g \leq 1$ の範囲のパラメータとして、その加重平均により、短周期の振動を抑制する処方を採用する。本実施例では、 $w=1$ とし、 $g=0.25$ とした。また、屈折率分布は実施例 1 と同様のステップインデックス型を想定し、同様の離散化の処方をとった。なお、本実施例の光回路としては実施例 1 と同じものを設定した。

ここで、図 13 A に示すように、このアルゴリズムにおいて、計算を実行するためには、以前のフィールドのデータが必要である。ここで、以前の伝搬させたフィールドのデータを保存しようとすると大量の記憶領域を必要とする。例えば $1000 \mu m \times 1000 \mu m$ の領域を $0.1 \mu m$ ピッチの均等メッシュで計算する場合、単純な一組のフィールドペアだけでも倍精度実数値で複素数値として $2 \times 8 \times 10^8 = 1.6 Gbyte$ 必要となり計算が困難となる。そこで、図 13 B にあるように、一度伝搬させたフィールドを逆方向に伝搬させることで、丁度途中まで伝搬させたのと

同じになることを利用して、波面の部分だけのメモリで済むようとした。

具体的には図 1 3 C にあるように逆方向に伝搬させた $\phi^j(z=0, x, \{n_{q-1}\})$ を初期値として順方向に伝搬させた $f(z, x, \{n_{q-1}\}; \phi^j_{q-1})$ を $\phi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ として用い、 $\psi^j(z=z_e, x, \{n_{q-1}\})$ を初期値として逆伝搬させた $g(z, x, \{n_{q-1}\}; \psi^j_{q-1})$ を $\psi^j(z, x, \{n_{q-1}\})$ として用いることによって波面 2 つ分だけのメモリで計算することができる。この計算は図 1 2 のアルゴリズムにるようにフィールドを計算領域の両端まで計算することになるので今度はそれを初期値として反対方向に伝搬させればよい。この方法は計算量が 2 倍になるため計算が遅くなるが状況に応じてメモリに一度保存する方法と使い分ければよい。

図 1 4 A および図 1 4 B は、実施例 1 と実施例 2 での計算の収束の様子を示した図で、図 1 4 A および図 1 4 B は、各々、実施例 1 および実施例 2 における、計算の繰返し回数に対する所望の出力ポートへの透過率 (d_B) と他の出力ポートへの漏話 (d_B) を表示している。これらの計算の繰り返し回数は、図 7 および図 1 2 に示したループの繰り返し数に相当しており、概ね同等の計算量になっている。

図 1 4 A および図 1 4 B の両方のグラフの比較からわかるように、実施例 1 で採用した計算方法では収束までに 200 回程度の繰返しを要しているのに対し、実施例 2 で採用した計算方法では数回の繰返しで収束している。すなわち、実施例 2 で採用した計算方法は、実施例 1 で採用した計算方法に比較して数十倍速く収束する。このため、実施例 2 で採用した計算方法を比較的大規模な光回路の設計に適用することが可能である。

図 1 5 A および図 1 5 B は、本実施例の光回路の屈折率分布

(図 15 A) と透過スペクトル (図 15 B) を説明するための図である。この光回路の透過スペクトルも、図 10 B と同様に、波長 $1.31 \mu\text{m}$ の光が出力ポート a から出力される一方、波長 $1.55 \mu\text{m}$ の光が出力ポート b から出力される特性を示しており、
5 波長による分波器 (および合波器) が形成されていることがわかる。

図 15 A に示した本実施例の光回路の屈折率分布は、図 10 A に示した実施例 1 の光回路の屈折率分布と比較して、高屈折率部 1 - 1 1 が比較的一様に分布している。このため、有効屈
10 折率は一様化傾向が強くなり、光回路設計領域 1 - 1 での基板の厚み方向の有効屈折率の一様性が増大し、この方向での光閉じ込めムラが減少する。すなわち、基板厚み方向への光の散逸を抑制することが可能となり、図 11 A で示したような 2 つの高屈折率部分を用いて屈折率分布を設定しなくとも、单一の高
15 屈折率部 1 - 1 1 のみで光閉じ込めが可能な光回路を実現することが可能となる。

特に、屈折率分布を計算する際の初期の屈折率分布として、メッシュにより画定される各ピクセルの屈折率が空間的にランダムに分布するように設定することにより、計算により求められる最終的な屈折率分布がよりいっそうランダム分布となり、单一の高屈折率部のみを備えた構造により光回路を実現するのに適した屈折率分布を実現できる。

(実施例 3)

本実施例では、 $1.53 \mu\text{m}$ 、 $1.54 \mu\text{m}$ 、 $1.55 \mu\text{m}$ および $1.56 \mu\text{m}$ の
25 4 つの波長を分波および／または合波する波長多重合分波回路の設計方法について説明する。

図 16 A および図 16 B は、本実施例の 4 波長分波器の光回

路設計のための条件設定を説明するための図で、図 16 A は入力光の偏光状態が TE モードのみの設定の場合、図 16 B は入力光の偏光状態の TE モードに TM モードを加えた設定の場合について説明している。

5 先ず、TE モードのみの設定の場合は、図 16 A に示すように、入力ポート 3-1 から波長多重された光を入力し、複数個設けられた出力ポート 3-2 の各々のポートからそれぞれに異なる波長の光を出射させる。すなわち、入射面 2-1 には 1 つの入力ポート 3-1 を設け、出射面 2-2 には a、b、c および d の 4 つのポートを設定する。入力ポート 3-1 からは $1.53 \mu\text{m}$ 、 $1.54 \mu\text{m}$ 、 $1.55 \mu\text{m}$ および $1.56 \mu\text{m}$ の 4 つの波長が合波された光を入射し、出力ポート 3-2 のポート a、ポート b、ポート c およびポート d から、それぞれ、 $1.53 \mu\text{m}$ 、 $1.54 \mu\text{m}$ 、 $1.55 \mu\text{m}$ および $1.56 \mu\text{m}$ の波長の光を出力させる。したがって、屈折率分布を計算する際のフィールドの組み合わせは、4 つの出力ポート (a、b、c および d) 各々の $1.53 \mu\text{m}$ 、 $1.54 \mu\text{m}$ 、 $1.55 \mu\text{m}$ および $1.56 \mu\text{m}$ の波長の光のフィールドと、多重合波された入力光のフィールドとの組み合わせ（計 4 組）となる。

10

15

図 17 A および図 17 B は、本実施例で計算した光回路の透過損失スペクトラム（透過率 (dB)）を説明するための図で、図 17 A は入力光の偏光状態が TE モードのみの設定の場合（図 16 A の条件に対応）であり、図 17 B は入力光の偏光状態の TE モードに TM モードを加えた設定の場合（図 16 B の条件に対応）である。

20 入力光のフィールドを、基板 1 に対する偏光状態を TE モードとして条件設定すると、出力ポート 3-2 から出力される出力光のスペクトルは図 17 A のようになる。この図では、TE

25

モードの光を太線で表し、TEモードと直交する偏波状態であるTMモードの光を細線で表している。偏波状態ごとにスペクトルを計算しているのは、光回路中を伝搬する光が感じる実効的な屈折率が、TEモードとTMモードとでは僅かに異なるためである。そこで、本実施例では、入力ポート3-1から入力する4つの波長の光の各々を、TEモードの光とTMモードの光の偏波多重光とし、同一の波長を有するTEモードの光とTMモードの光を同一の出力ポート(a、b、cまたはd)から出力させることとし、波長別の4組のフィールドの各々を偏波状態ごとに2組に分類して計8組の入出力ペアを設定して屈折率分布を調整することで波長多重の分波回路設計を行った(図16B)。

このような方法によれば、図17Bに示すように、偏光状態の相違に起因する透過損失の違いを低減できる。尚、あえて図示することはしないが、図16Bに示した設計条件の変形として、入力ポートからは偏波多重された光を入力し、各偏波ごとに異なる出力ポートを指定して出力させるように屈折率分布を調整するようにしてもよい。

上述したように、波長と偏光状態とをパラメータとして入射／出射フィールドの組を設定することとすれば、偏光無依存の光回路や偏光依存の光回路が自由に設計できる。また、基板のもつ複屈折をパラメータとして計算に取り込むことで、偏波依存性を取り除くことも可能となる。

従来の石英系の光導波路を用いたアレイ導波路格子で同等の機能を有する光回路を構成する場合には、アレイ導波路の本数を十分多数に設けるためにはスター・カプラの部分だけでも数mmの長さを必要とすることに加え、アレイ導波路も湾曲させる

必要がある。このため、光回路の大きさが数 mm 角以上（典型的には 1 cm 角以上）のものとならざるを得ない。さらに、偏波依存性をなくするために光回路内に波長板を挿入して設ける場合もあり得る。これに対して、本実施例の光回路設計によれば、従来の光回路の 100 分の 1 以下の大きさで、同等の機能の光回路を構成することが可能となる。

（実施例 4）

本実施例は光波長帯域透過回路を構成した例である。

図 18 A および図 18 B は、本実施例の光回路設計のための条件設定を説明するための図で、図 18 A は単純なバンド透過フィルタを設定した場合、図 18 B はバンド整形用のダミーポートを設けた場合の図である。なお、これらの光回路の全長は 1500 μm である。

また、図 19 A および図 19 B は、各々、図 18 A および図 18 B に示した条件設定の下で調整された光回路の出力ポートから出力される出力光の透過損失のスペクトラムである。

図 18 A に示した条件設定においては、入力ポート 3-1 から、1.530 μm、1.535 μm、1.540 μm、1.550 μm、1.555 μm および 1.560 μm の 6 つの波長の光を波長多重光として入力し、10 μm 離間して設けられた出力ポート 3-2 の 2 つのポート (a および b) において、1.530～1.540 μm 帯域の光をポート a に、1.550～1.560 μm 帯域の光をポート b から出力させるように、各波長の光の位相を調整して所望の分散特性を実現している。

計算方法には実施例 2 で説明した方法を採用し、実施例 3 と同様の分解能と回路規模を仮定している。この場合、図 17 A および図 17 B で示したように、1 波長についてのフィールドの組を設定した場合の 3 dB 減衰波長帯域幅は片側約 5 nm で

あることから、波長の間隔を 5 nm とし、上記 6 つの波長の各フィールドの組を得ようとする透過帯域に一様に分布させた。上記の計算方法で求めた透過損失スペクトルは、図 19A に示すように概ね矩形状となるが、短波長領域の透過を十分に抑制するには至っていない。そこで、図 18B に示すように、出力側にもう 1 つのポート（ポート c）をポート a と 10 μm 離間して設けることとし、このポート c をバンド整形用のダミーポートとして用い、このダミーポートから 1.510 μm、1.515 μm および 1.520 μm の 3 組の光信号を出力させることとして計算を実行した。

このようなダミーポートを設けると、図 19B に示す透過スペクトルが得られ、短波長領域においても光の透過を十分に阻止することが可能となり、ポート a およびポート b（ならびにポート c）から出力される各スペクトルが矩形状となる透過フィルタを得ることが可能となる。

（実施例 5）

本実施例は、実施例 4 と同様に、光波長帯域透過回路の構成例である。なお、波長や領域の大きさ（光回路全長 600 μm）のパラメータを、実施例 4 とは変えている。また、上記実施例 1～4 では入力フィールドと出力フィールドを場所（光回路設計領域内の位置）の実数値ベクトル関数としたのに対して、本実施例においては複素数値ベクトル関数として計算を実行している。具体的には、光回路の出力ポートを複数（ポート a、ポート b およびダミーポート c）設け、これらの出力ポートから平面波的な（すなわち位相分布のない）フィールドを出力させる場合において、互いに隣接する出力ポートから出力される光（出力フィールド）が異なる位相を有するように条件設定

されている。すなわち、ポートaとポートbのフィールドは一様な複素数値をもち、かつ、位相差をもつように設定されている。

図20Aおよび図20Bは、本実施例の光回路の設定条件と
5 その光回路の透過損失のスペクトラムを説明するための図である。図20Aに示すように、入力ポート3-1から、 $1.510\text{~}\mu\text{m}$ から $1.560\mu\text{m}$ の波長範囲にあって互いに 10~nm の波長差を有する光（波長 10~nm 間隔）を入力し、出力ポートaから $1.530\mu\text{m}$ 、 $1.535\mu\text{m}$ および $1.540\mu\text{m}$ の光を、出力ポートbから $1.550\mu\text{m}$ 、 $1.565\mu\text{m}$ および $1.560\mu\text{m}$ の光を、そして、ダミーポートcからは $1.510\mu\text{m}$ 、 $1.515\mu\text{m}$ および $1.520\mu\text{m}$ の光を、それぞれ出力させる。なお、ポートaとポートbとは $7\mu\text{m}$ 離間され、ポートaとダミーポートcとは $10\mu\text{m}$ 離間されて設けられている。
10
15

ここで、入力ポート3-1から入力される光との位相差を、ポートaでは 0 、ポートbでは π とした。また、ポートaとポートbとの間隔を $7\mu\text{m}$ と極端に近づけた。これにより、ポートaに出力されるべき光がポートbに漏話したり、ポートbに出力されるべき光がポートaに漏話することを抑制することができる。これは、入力ポート3-1から入力される光との位相差をポートaとポートbとで同じとした場合には、ポートaおよびポートbにおいて漏話光と非漏話光とが共にほぼ同じ位相となるために、漏話光が信号光と同じように集光され、その結果、漏話光が大きくなるのに対して、入力ポート3-1から入力される光との位相差をポートaとポートbとで異なるように設定する上述した本実施例の場合には漏話光同士が干渉して、各ポートへの漏話光の集光が抑制されるためである。
20
25

図 2 0 B 中の実線は、ポート a とポート b から出力されるフィールドの位相に位相差 π を設けた場合のスペクトルであり、破線は、ポート a とポート b から出力されるフィールドの位相に位相差 π を設けない（位相差 0）場合のスペクトルである。

5 この図に示すように、何れの場合もポート a およびポート b から出力される光のスペクトルが矩形状となる透過フィルタを得ることが可能となるが、上述のようにポート a とポート b から出力されるフィールドの位相に位相差 π を設けた場合には、位相差を設けない場合に比べて漏話が抑制され、より急峻な矩形

10 フィルタが得られている。

本実施例の結果は、各チャンネルに対して位相パラメータを設定するだけで、出力光の位相を制御することが可能であることを示している。なお、このような位相関係は出力ポート間だけではなく入力ポートとの間にも設定され得るものであるから
15 、これらのポート相互間での位相制御により、外部の他の導波路回路などと本光回路とを組み合わせて Mach-Zehnder (MZ) 干渉回路などを構成することが可能である。

(実施例 6)

図 2 1 A ~ 2 1 D は、本実施例の光回路の入出力ペアの設定
20 (図 2 1 A) 、 $1.55\mu\text{m}$ の出射フィールド分布の設定 (図 2 1 B) 、ならびに、ポート A およびポート B から入力光を入力させた場合の各々の出力光の透過損失スペクトラム (図 2 1 C および図 2 1 D) を説明するための図である。

この実施例の光回路は、図 2 1 A に示すように、入力ポート
25 3 - 1 として 2 つのポート (ポート A およびポート B) を設け、ポート A から $1.29\mu\text{m}$ 、 $1.30\mu\text{m}$ 、 $1.31\mu\text{m}$ および $1.32\mu\text{m}$ の 4 つの波長の波長多重光を入力して出力ポート 3 - 2 として設け

られた4つのポート（a、b、cおよびd）から上記4つの波長の光を分波して出力させるとともに、ポートBから入力した $1.55\mu\text{m}$ の光をこれら4つの出力ポート（a、b、cおよびd）に分配して出力する光回路である。

5 このような光回路は、例えば次のような用途に用いることができる。配信距離が異なる場所に設置された4つの端末に1つの基地端末から光ファイバを接続し、データ通信用として $1.29\mu\text{m}$ 、 $1.30\mu\text{m}$ 、 $1.31\mu\text{m}$ および $1.32\mu\text{m}$ の波長の光を充てて、かつ、 $1.55\mu\text{m}$ の光を分配して一斉に配信するような場合を想定する。10 4つの端末に接続されている光ファイバに $1.55\mu\text{m}$ の波長の光を均等分配するよりも、各光ファイバの損失に応じて $1.55\mu\text{m}$ の光を分配することにより、配信距離が異なる端末に対しても同等の光信号強度で送信することが可能となる。

本実施例においては、このような状況を設定して、図21Bに示すように、 $1.55\mu\text{m}$ の光を、ポートaとポートcには $1/6$ ずつ、ポートbとポートdには $1/3$ ずつ、の強度比となるように分配することとしている。すなわち、強度が互いに相違する4つのポート（a、b、cおよびd）のフィールド分布の重ね合わせにより出射面2-2における出射フィールドの強度分布を求めることとして、実施例2で説明した手順で計算を実行した。なお、 $1.29\mu\text{m}$ 、 $1.30\mu\text{m}$ 、 $1.31\mu\text{m}$ および $1.32\mu\text{m}$ の波長の光については、実施例3と同様に、各波長毎に4つのフィールドの組を設定している。

25 図21Cに示したスペクトラムによれば、入力ポートAから入力された波長多重光は、各々の波長に応じて分波され、これらの光の各々が4つの出力ポート（a、b、cおよびd）から出力されていることが分かる。

また、図21Dに示したスペクトラムによれば、入力ポートBから入力された波長 $1.55\mu\text{m}$ の光は、ポートaおよびポートcには概ね $1/6 (=8\text{dB})$ 、ポートbおよびポートdには概ね $1/3 (=5\text{dB})$ の割合で分配されているのが分かる。

5 このように、本実施例の回路設計方法を用いることにより、容易に光分配回路を設計することが可能である。なお、当然のことではあるが、この光回路に逆向きに光を入射させることとすれば光合波も可能であるから、光合波回路の設計も可能である。

10 また、本実施例の光回路は、光回路設計領域に1つの屈折率分布を与えることで、波長分波器と光分配器という2つの機能を有する回路を実現している。このように、本発明によれば、異なる機能（を有する領域）を同一の光回路設計領域上に設けることが可能であるから、極めて容易に集積化することができる。

(実施例7)

本実施例では、伝搬光の反射をも考慮した光回路の設計方法について説明する。光回路中の光には、多重散乱しながら進行する伝搬波だけではなく反射波も存在し得るから、この反射波の存在も考慮してフィールド設定することにより、特性のより優れた光回路を実現することが可能である。

反射現象をも考慮した場合のフィールドの伝搬は、「伝搬行列」によって記述可能であり、この伝搬行列は、入射（波）成分と反射（波）成分に対する行列の形で与えられ、その行列の形としては、例えば、“A bidirectional beam propagation method for multiple dielectric interfaces”(H. Rao et. al., IEEE PTL Vol.11, No.7, pp 830-832 (1999))などに記載が

ある。なお、この伝搬行列は、既に（基本概念）で説明した「ユニタリ変換」に相当する。

図22は、反射成分をも考慮する際の伝搬行列の取扱いの概要を説明するための図で、光回路中の微小部分のみに着目して
5 図示した図である。

H. Rao, et. al, "A bidirectional beam propagation method for multiple dielectric interfaces", IEEE PTL Vol. 11, No. 7, pp 830-832 (1999)によれば、位置(x, z)における屈折率 $n(x, z)$ についての偏微分方程式である次式(12)

$$10 \quad \frac{\partial^2}{\partial z^2} = -(\partial / \partial \bar{x})^2 - k_0^2 n(\bar{x}, z)^2 \quad \dots \quad (12)$$

を形式的に解き、演算子

$$\partial / \partial z = \pm i L(z) \quad \dots \quad (13)$$

を定義して、j番目のz位置の演算子として

$$L_j \quad \dots \quad (14)$$

15 を用いて表記すると、

$$\begin{bmatrix} u_{out}^+ \\ u_{out}^- \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} u_{in}^+ \\ u_{in}^- \end{bmatrix} \quad \dots \quad (15)$$

で与えられる

$$M \quad \dots \quad (16)$$

20 が伝搬行列である。

式(15)で用いた記号 u_{in} および u_{out} の各々は、図22に示した光回路の微小部分の入力面2-1(in)および出力面2-2(out)におけるフィールドを意味しており、 z_j または z_{j-1} は、この光回路の微小部分が、光回路設計領域の全体に仮想的に設けたメッシュにより画定されたj番目または(j-1)番目の層のz位置を意味している。すなわち、図22中の入力面2-1および出力面2-2は、この微小領域の入力面および出力面なのであって、光回路全体の入力面および出力面を意

味するものではないことに注意されたい。なお、添字の+または-は、それらのフィールドの入射成分(+)または反射成分(-)であることを意味している。

ここで、

$$5 \quad M = P_n T_{n-1,n} \cdots P_2 T_{1,2} P_1 \quad \cdots \quad (17)$$

$$P_j = \begin{bmatrix} e^{iL_j dz} & 0 \\ 0 & e^{-iL_j dz} \end{bmatrix} \quad \cdots \quad (18)$$

$$10 \quad T_{j+1,j} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + L_{j+1}^{-1} L_j & 1 - L_{j+1}^{-1} L_j \\ 1 - L_{j+1}^{-1} L_j & 1 + L_{j+1}^{-1} L_j \end{bmatrix} \quad \cdots \quad (19)$$

の関係がある。

本発明においては、反射成分を予め与えることとし、次式(20)

$$15 \quad P_{j+1} (P_{j+2} T_{j+1,j+2})^{-1} \cdots (P_n T_{n-1,n})^{-1} \begin{bmatrix} u_{out}^+ \\ u_{out}^- \end{bmatrix} = (T_{j,j+1} P_j) (T_{j-1,j} P_{j-1}) \cdots (T_{1,2} P_1) \begin{bmatrix} u_{in}^+ \\ u_{in}^- \end{bmatrix} \quad \cdots \quad (20)$$

の左辺を(j+1)番目の層までの逆伝搬光 $\phi(z_{j+1})$ 、右辺を(j-1)番目の層までの伝搬光 $\psi(z_{j-1})$ と考えて、

$$(T_{j-1,j} P_{j-1})$$

で与えられる「屈折率」(屈折率に相当する演算子)を調整することで、所望の機能を有する光回路を得る。

例えば、各層間の界面での反射が弱い場合には、

$$L_{j+1}^{-1} L_j = 1$$

が良い近似で成り立つから、

$$25 \quad T_{j-1,j} \approx \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

と近似できる。

そして、

$$P_j = \begin{bmatrix} e^{iL_j dz} & 0 \\ 0 & e^{-iL_j dz} \end{bmatrix} \quad \dots \quad (18)$$

は、反射が全く無い状態での光の伝搬を与える演算子であるから、これまでの実施例で説明してきた2つの方法と同様の設計方法により光回路設計を行うことができる。

すなわち、入力面から入力される入射波と、入力面側へ向かう反射波と、を設定し、さらに、出力面から出力される出力波を設定する。そして、光回路設計領域の各点において、伝搬方向（すなわち入力面2-1から出力面2-2に向かう方向）に進むフィールドと、反射方向（すなわち出力面2-2から入力面2-1に向かう方向）に進むフィールドと、を仮定して、実施例1と同様の手順により計算を実行すればよい。なお、因果律によれば、出力面側に向かう反射波は発生しないはずなのでゼロであるが、光回路の途中では出力面側へ向かう反射波成分も存在し得る。

一般に、光回路中での空間的な屈折率変化が小さな場合には、光回路内で生じる反射波成分は極僅かである。したがって、屈折率変化が光回路中の光に与える主な影響は、伝搬方向へ進行する光に対しては伝搬方向へ伝搬する際の位相変化であり、反射方向へ進行する光に対しては反射方向に伝搬する際の位相変化となる。このため、伝搬方向に進行する入射波成分と伝搬方向に進行する反射波成分とを合わせて1つの順伝搬波とし、入射光からみたときに、反射方向に進行する入射波成分（逆伝搬させた出力波）と反射方向に進行する反射波成分（逆伝搬させた出力波と対となる反射成分）とを合わせて1つの逆伝搬波とする（すなわち、回路を散乱行列とみなす）。そして、これら2つの波の各々に対応するフィールドを仮定して、実施例1

もしくは実施例 2 で説明した方法によって局所的な屈折率を変化させて屈折率分布を計算すればよい。

図 23 A および図 23 B は、本実施例の光回路（波長フィルタ）の設定条件とその光回路の透過損失のスペクトラムを説明するための図である。図 23 A に示すように、入力ポート 3-1 から $1.31 \mu m$ 、 $1.49 \mu m$ および $1.55 \mu m$ の波長の光を波長多重光として入力し、出力ポート 3-2 として設けた 3 つのポート（ポート a、ポート b およびポート c）の各々から上記 3 つの波長の光ごとに出力して波長フィルタとして機能させる。本実施例では、ポート a から $1.31 \mu m$ 、ポート b から $1.49 \mu m$ 、そして、ポート c からは $1.55 \mu m$ の波長の光を、それぞれ出力させる。各ポート間隔は $10 \mu m$ であり、光回路長は $1 mm$ ($100 \mu m$) である。

この光回路は、シリコン基板上に設けられた石英からなる平面光回路であって、光回路設計領域 1-1 における石英の局所的な屈折率が高屈折率部または低屈折率部となるように調整を行うことで光回路の屈折率分布が設定されている。なお、高屈折率部と低屈折率部の比屈折率差は 1.5 % である。

図 23 B に示すように、この光回路からは、低い損失と急峻な透過特性を有する 3 つの波長の光が各出力ポートから出力されており、波長フィルタ特性に優れた光回路が得られている。このように、光回路中での反射波をも考慮して回路設計することにより、フィルタ特性に優れた光回路を作製することが可能となる。

25 (実施例 8)

本実施例では、本発明の波動伝達媒体を用いて 16 分岐光回路を構成した例について説明する。

図 24 A～C は、この 16 分岐光回路における、屈折率分布（図 24 A）、光伝搬の様子（図 24 B）、および、16 個の各出力ポートから出力される光の光透過損失 dB（図 24 C）を示している。

この光回路は、シリコン基板上に、高屈折率部と低屈折率部の比屈折率差 Δ が 0.75% の石英を堆積させた光回路設計領域をエッチングによりパターン形成したもので、光回路の大きさは $420 \mu\text{m} \times 1800 \mu\text{m}$ である。図 24 B に示したように、光回路の入射面中央部（図中の下側中央）から入力された光は、光回路設計領域中を多重散乱しながら伝搬して、光回路の出射面（図中の上側）に設けられた 16 のポートから出力される構成となっている。

図 24 A に示した屈折率分布は実施例 2 で説明した方法により求めた結果であり、この図において、黒色部は高屈折率部、白色部は低屈折率部に相当しており、ピクセルサイズ（メッシュにより画定されたピクセルに相当）は $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ である。

この光回路に光伝搬させたときのフィールドの様子を数値計算して求めた結果を示す図 24 B 中の濃淡は光強度分布を意味しており、1 本の入力光は光回路の出射面において 16 本の光に分岐され、各々の光が 16 個のポートから出力される。これらの 16 個のポートに番号付け（左から 1、2、…、16）し、各ポートから出力される光の透過損失を測定した結果を図 24 C に示している。16 個のポートの損失は原理損失 1.2 dB を基準として概ね 2 dB 以内に分布しており、均等かつ低損失の光分配が実現されていることがわかる。

このように、本発明の光回路設計方法によれば、 $1800 \mu\text{m}$ という極めて短い導波路長で容易に光分割することが可能と

なる。従来の光回路で同等の機能を実現させる場合に必要とされる導波路長が 1 cm 程度であることを勘案すると、本発明により導波路長の大幅な短縮化が可能であり、小型光回路を容易に実現できることが理解される。

5 (実施例 9)

本実施例では、本発明の波動伝達媒体を用いて光導波路に所望の曲率をもたせた「曲げ回路」を構成した例について説明する。

誘電体で構成される光導波路においては、導波路からの光の放射を回避するために、光導波路の急激な曲げを避ける必要がある。したがって、曲げ回路の導波路は一定の曲率半径以上の小さな曲率を有するように設計される。例えば、比屈折率差 $\Delta = 1.5\%$ を有する石英系光導波路コアとクラッドとで構成される従来の曲げ回路では、5 mm 程度の曲率半径となるように回路設計することで湾曲した光回路を実現していた。

これに対して、本実施例の光回路では、光導波路から一旦外部に漏れ出た光を多重散乱により反射させて元の光導波路に戻すことが可能となるため、大きな曲率（小さな曲率半径）で光導波路を設計することが可能となり、その結果、光回路を小型化することが可能となる。

図 25 A および図 25 B は、本実施例の曲げ回路の屈折率分布（図 25 A）と光伝搬の様子（図 25 B）を説明するための図である。

この光回路は、シリコン基板上に、高屈折率部と低屈折率部の比屈折率差 Δ が 1.5% の石英を堆積させた光回路設計領域をエッティングによりパターン形成したもので、光回路の大きさは $100 \mu m \times 90 \mu m$ である。図 25 B に示したように、光回

路の入射面中央部（図中の下側中央）からこの入射面に対して -5 度の角度で入力された光は、光回路設計領域中を多重散乱しながら伝搬して、光回路の出射面（図中の上側）に対して +5 度の角度で出力される。

5 図 25 A に示した屈折率分布は実施例 2 で説明した方法により求めた結果であり、この図において、黒色部は高屈折率部、白色部は低屈折率部に相当しており、ピクセルサイズ（メッシュにより画定されたピクセルに相当）は $0.7 \times 0.7 \mu\text{m}^2$ である。

10 この光回路に光伝搬させたときのフィールドの様子を数値計算して求めた結果を示す図 25 B 中の濃淡は光回路設計領域における光強度分布を意味しており、導波路の外側へと漏れ出した光は多重散乱によって導波路へと反射されて戻り、放射による導波路からの光の漏れ出しが回避されている。また、この図 15 に示されている出力側と入力側のフィールド形状はほぼ同様の形状となっており、導波路の外側へと漏れ出した光に起因するフィールド形状の乱れが多重散乱により抑制されて、フィールド形状が整形されていることが分かる。

本実施例の曲げ回路では、 $90 \mu\text{m}$ の導波路長で光の入出力 20 角度差 10 度の曲げが実現されている。この曲げを曲率半径に換算すると約 0.5 mm に相当しており、極めて小さな曲率半径（大きな曲率）の導波路が実現されることになる。また、この曲げ回路における光の挿入損失は 0.1 dB 以下であるから、この曲げ回路を複数個繰り返して設けて 90 度程度の曲 25 げを実現したとしても、その損失は僅かに 1 dB 以下となることが期待され、極めて小型の曲げ回路を実現することが可能である。

(実施例 10)

本実施例では、本発明の波動伝達媒体を用いて多モード干渉回路（MMI）を構成した例について説明する。

光回路においては、光のフィールドが伝搬方向に大きな波数（すなわち運動量）をもつと、横方向（伝搬方向と垂直方向）の波数（すなわち横方向の運動量）が小さくなり、その結果、屈折率差が比較的小さい界面においても光が横方向に反射されることとなる。この現象を利用してある程度の幅広の光導波路を構成すると、伝搬光のフィールドはこの光導波路中で反射を繰り返しながら大きく蛇行して進行し、実効的な光路長を長くすることが可能となる。このような光伝搬現象は、複数のモードの光が存在し得る光回路中において、これら各モードの光が互いに干渉し合いながら伝搬していることに対応し、このような光回路は、多モード干渉回路（MMI）と呼ばれる。

しかし、従来の多モード干渉回路中では、ある次数以上の高次モードは存在できず、外部に放射されてしまう。すなわち、光回路の幅を広く設定するほど光回路中を伝搬する光の大きな蛇行が期待され実効的な光路長を長くすることが可能となるが、その一方で、放射により光回路外部へと光が漏れ出てしまうという問題があった。

本実施例では、このような問題を解決するために、多モード干渉回路の内部に本発明の光回路を設けることとした。

図26Aおよび図26Bは、本実施例における光回路設計領域における屈折率分布（図26A）と、この光回路中を伝搬する光の波長毎のフィールドの伝搬の様子を説明するための図（図26B）である。

この光回路は、シリコン基板上に、高屈折率部と低屈折率部

の比屈折率差 Δ が 0.75% の石英を堆積させた光回路設計領域をエッチングによりパターン形成したもので、光回路の大きさは幅 $60 \mu m \times$ 長さ $3000 \mu m$ である。図 26 A 中の下部が入射面に対応し、この入射面に設けられた 1 つのポートから 1.31
5 μm 、 $1.49 \mu m$ および $1.55 \mu m$ の 3 つの波長の光が波長多重された光が入力され、これら 3 つの波長の光の各々はその波長に応じて異なる蛇行様で光回路中を進行し、図中の上部で表される出射面に設けられた 3 つのポートから各波長の光毎に出力される。すなわち、この光回路は波長選択フィルタとして機能
10 する。

図 26 A に示した屈折率分布は実施例 2 で説明した方法により求めた結果であり、この図において、黒色部は高屈折率部、白色部は低屈折率部に相当しており、ピクセルサイズ（メッシュにより画定されたピクセルに相当）は $3 \times 3 \mu m^2$ である。
15

この図の左右の各々に示されている縦方向に延在する帯状の低屈折率領域は、従来の多モード干渉回路でも設けられている領域であり、これらの帯状領域の間の高屈折率領域中に分散して設けられた低屈折率部により本発明で設定される屈折率分布が与えられている。

この光回路に光伝搬させたときのフィールドの様子を各波長毎に数値計算して求めた結果を示す図 26 B 中の濃淡は光回路設計領域における光強度分布を意味しており、何れの波長の光も光回路中を蛇行しながら進行している様子、および、光回路内でも多重散乱により多モード干渉回路部分の外部へと漏れ出る光は殆どないことが理解できる。
20
25

図 26 B に示されている光の蛇行の様子からわかるように、この回路中では、斜めに広がって進行する光が回路側面で折り

返され、この折り返しを繰り返しながら各出力ポートへと集光される。従って、この光回路では、小さな面積の光回路設計領域内で大きな光路長差をもたせることができあり、かつ、個々のピクセル（個々のピクセルの屈折率）が伝搬フィールドに及ぼす影響を高めて光を効率的に制御することが可能となっている。また、本実施例の多モード干渉回路の各出力ポートとも、伝搬損失は約 0.8 dB、漏話量は -20 dB 以下であり、波長選択フィルタとして良好な特性が得られている。

以上のように、本実施例の多モード干渉回路では、伝搬光の漏れを抑制することのみならず、回路の小型化および光の制御性を高めることが可能となる。

（実施例 1 1）

本実施例の光回路は、1.3 μm と 1.55 μm の 2 つの波長の光の波長多重光を各々の波長の光に分波する平面光波回路である。このような分波回路を実施例 1 で説明した方法により設計しようとすると、図 27A の右図のように、光回路設計領域内に分布させる低屈折率部が多く必要となって基板厚さ方向での光閉じ込めが困難となり、図 11 に示したような特別な光閉じ込め構造としなければならないことは既に説明した。

これに対して実施例 2 では、特別な光閉じ込め構造を不要とするために屈折率分布の初期値をランダムにとり、図 15A に示したような屈折率分布とすることで実効的な光閉じ込めを実現した。

本実施例においては、さらに、屈折率分布の決定に際してなるべく高屈折率部が多くなるように高屈折率部と低屈折率部を分布させ、低屈折率を有するピクセルが連続して配列される領域がなるべく少なくなるように屈折率分布を決定することとし

た（図27Aの左図）。このことは、低屈折率を有するピクセルを高屈折率を有するピクセルの存在しない領域、すなわち高屈折率ピクセルの空隙として観念した場合には、この高屈折率ピクセルの空隙がなるべく連続して分布することができないよう5可能な限り多くの高屈折率ピクセルを分布させることで屈折率分布を決定するもの、と言い換えることもできる。

このための具体的な方法は以下のとおりである。まず、アルゴリズムを、屈折率分布中での光導波路のコアに相当する部分が多くなるように実施例 2 で説明したアルゴリズムを以下のように改良する。

すなわち、

$$n_{\text{offset}} > 0$$

なる量を定義して、

$v_q(z, x) > (n_{core} + n_{clad}) / 2 - n_{offset}$ のときは $n_q(z, x) = n_{core}$

15 : : : (2, 1, a)

$v_q(z, x) < (n_{core} + n_{cladd}) / 2 - n_{offset}$ のときは $n_q(z, x) = n_{cladd}$

• • • (2 1 b)

とする。ここで、 n_{core} はコアに相当する屈折率で高屈折率部の屈折率に相当し、 n_{clad} はクラッドに相当する屈折率で低屈折率部の屈折率に相当する。したがって、光回路設計領域内での屈折率分布は、これらの 2 種類の屈折率を空間的に分布させて得られることになる。このような n_{offset} の導入により、コア部分が多い光回路を設計することが可能である。なお、 n_{offset} なる量は、以下のようにして求められる。

図27Bは、単位長さ当たりの導波路中に空隙が出現する確率（横軸）と、高屈折率部の空隙が連続する（すなわち低屈折率部が連続する）ピクセルの数 N_p 每の頻度（縦軸）との関係を

説明するための図で、モンテカルロ法での計算結果である。N_g 値の違いは空孔の繋がり具合を反映するものであるため、導波路中での単位長当たりの頻度は N_g 値によって異なる。なお、横軸で示した空隙の出現確率がゼロとは単位長の導波路に全く空隙がない場合であり、出現確率が 1 とは単位長の導波路の全てが空隙の場合であり、出現確率が 0.5 とは単位長の導波路の半分が空隙の場合に相当する。また、例えば N_g = 1 の場合の曲線において単位距離当たりの頻度が 0.1 というのは、10 のピクセルからなる列を想定したときに、確率的に 1 つの N_g = 1 の空隙ピクセルが存在するという意味である。

この計算では、横方向に連続した空隙がフィールドに及ぼす影響は事実上無視できる程度のものであるために考慮しないこととして、光回路の縦方向領域のみを対象とする。このような取扱いが妥当なのは、光が伝搬する回路中において、激しく電磁界が変化するのは伝搬方向であることによる。

空隙の単位長はコアの屈折率分布のメッシュ間隔とされ、例えばメッシュ間隔を 1 μm と設定した場合の空隙の単位長は 1 μm となる。従って、このような空隙で互いに離隔された高屈折率ピクセル間の間隙は、N_g = 0, 1, 2, ... の各々について 0 μm, 1 μm, 2 μm, ... となる。

光通信等に利用される光の波長範囲では、屈折率が約 1.5 の媒体中での波長は約 1 μm となるから、光回路中に数 μm の間隙があるとすると光が放射的になって損失が生じてしまう。光回路の一般的な加工精度は 1 μm 程度であるから、1 μm 程度の間隔でメッシュを設定して光回路の屈折率分布を決定する場合を想定すると、N_g = 3 以下に抑えることが望ましい。

そこで、図 27B を基に、N_g = 4 以上の間隙が殆ど生じず

、かつ、屈折率変化が生じるコアとクラッドとの界面が適当に多くなる条件を探すと、 $N_g = 1$ の空隙の出現確率を 0.2 ± 0.05 程度とすることが望ましいこととなる。このことは、
実施例 1 の設計条件で決定される屈折率分布において、コア部
5 とクラッド部が同等の分布確率で略ランダムに分布するものとし、かつ、そのバラツキ (2σ) が屈折率差程度であるものとし、さらに、正規分布するものであると仮定して、コアの配置パラメータを屈折率差の約 30 % 程度とすればよいことを意味している。すなわち、 $n_{\text{offsel}} = (n_{\text{core}} - n_{\text{clad}}) / 3$ 程度とすれば、屈折率変化する界面が適当に多く含まれ、かつ、コアの間隙幅が少ない光回路を構成することが可能となる。
10

このようなアルゴリズムに基づいて屈折率分布を決定し光回路を実際に試作して特性を調べたところ、図 27B のような屈折率分布とした場合の光損失が約 6 dB であったのに対し、図
15 27A のような本実施例の屈折率分布とした場合の光損失は約 2.5 dB であり、大幅な損失低減が確認された。

なお、本実施例においては、予め n_{offsel} を定数として与えることとしたが、定数である必要は必ずしもない。図 27B の横軸が単位距離あたりの空隙の出現確率とされていることからもわかるように、計算の途中で空隙の出現確率を集計し、その結果をもとに n_{offsel} を逐次変更することとすれば、より確実な修正が可能となる。すなわち、 $v_q(z, x)$ の頻度を求めて、たとえば 5 0 % に設定したい場合は n_{offsel} を $v_q(z, x)$ の平均値に設定するなどすればよい。
20 25

(実施例 1 2)

図 28A は本実施例の電極構造の断面図、図 28B はこの素子を用いた光回路の構成例である。図 28A は、複数の組の屈

折率分布を電気光効果により基板上に必要に応じて生じさせる
ことを特徴とする光波形整形器の例として、シリコン基板上に
、光学的に透明な絶縁膜（ここでは石英ガラス）を介して電極
をマトリクス状に設けて再構成可能な光回路を構成する例を図
5 示している。絶縁膜は $0.3 \mu\text{m}$ 程度、ドープ領域は $3 \mu\text{m}$ 程度
の厚みである。この例ではさらにその下にガラス層がある所謂Silicon-On-Insulator (SOI) 構造の基板を用いている。電極に
電圧を掛けることにより電子濃度の変化から 10^{-3} 程度の比
屈折率差を与えることが可能である。これはMOS構造である
10 ので、通常の半導体プロセスにより容易に微細かつ大規模なもの
のをつくることが可能である。一般に 10^{-3} の比屈折率差では
は光導波路構造をつくったとしても非常に閉じ込めが弱いため現実的な回路を構成することは困難であるが、UV光により石
英ガラスに書き込むファイバグレーティングのような弱い屈折
率変調でも大きな光の反射が可能なのと同様に、広い領域計算
領域を用いて本実施形態により光回路を設計すれば実用的な光
回路を構成することができる。

上記実施例 1 ~ 11 で説明したように屈折率分布のパターン
を設計し、その屈折率分布に合わせて電圧の分布を生じさせることにより光回路を構成できる。特に、複数の屈折率分布をあらかじめ半導体メモリ等に入れておき、必要に応じて電圧の分布を変化させることで光回路を再構成できる。また、回路はMOSのプロセスを適用できるので、フラッシュメモリと同様の構成を用いれば書き込み式の光回路を構成できる。すなわち、
20 ソース、ドレイン、フローティングゲートとコントロールゲートを回路の一部に設け、ソース、ドレイン部分の屈折率制御は放棄して、フローティングゲート直下の屈折率変化により光回

路を構成する。ここで、ソース、ドレイン部分へは回路再構成の際にのみ通電すればよいので、屈折率分布としては電圧をOFFにした状態で回路を構成すればよい。

本実施形態により、5mm角程度のチップサイズに100万電極程度をマトリックス状に配置し波形整形器ができた。これは基板に対してフィールド径として数百ミクロンに拡大し、かつ、位相分布を制御するもので、突き当て結合により結合したスラブ導波路を介して対向する同様の素子に対して光合分波が可能である。ここで、これらの光部品（ファイバ、本実施形態の素子、スラブ導波路）は光学的に透明な接着剤で接合されている。

図28Bは図28Aの素子を用いた光回路の例で、ここではフィールドを拡大するとともに横方向に一様な位相勾配を与えることで左端下から右上に光信号を伝搬させている。位相を適当に調整することにより複数のチャンネルへの分配も可能である。

(実施例13)

本実施例の光回路は、指向性が低くかつ波長依存性が高いレイリー散乱を利用した $1.31\mu\text{m}/1.55\mu\text{m}$ の波長フィルタである。

光の波長の10分の1以下程度の大きさを有する物体による散乱は一般にレイリー散乱とよばれ、指向性が低くかつ波長依存性（波長の4乗分の1に比例）の高い散乱がえられる。本実施例では、光回路を構成する波動伝達媒質の高屈折率部分のピクセルサイズを、光回路中を伝搬する光の、伝搬方向に垂直な方向の波長成分の長さ程度以下のサイズとすることで、レイリー散乱の発生条件を満足する屈折率分布（誘電体分布）を実現して充分に大きな光制御性を得ている。

図29Aおよび図29Bは本実施例の $1.31\mu\text{m}/1.55\mu\text{m}$ の

波長フィルタの構成例を説明するための図で、図 29A はこの光回路の平面図であり、図 29B は高屈折率部のピクセルと低屈折率部のピクセルの配置の様子を説明するための図である。

図 29A 中の黒色部は高屈折率部を意味しており、入力ポート 3-1 から、 $1.31\mu\text{m}$ と $1.55\mu\text{m}$ の波長の光を入力し、出力ポート a から $1.31\mu\text{m}$ の光を、出力ポート b から $1.55\mu\text{m}$ の光を、それぞれ出力させる。なお、この光回路の光伝搬方向の長さは $1000\mu\text{m}$ であり幅は $160\mu\text{m}$ である。この光回路の屈折率分布は、図 29B に示すように、各々がピクセルサイズ W を有する、高屈折率部のピクセル（網掛け部）と低屈折率部（白抜き部）のピクセルを配置させることにより決定される。

このような、ピクセルサイズ W を有する誘電体を多数配置して構成される導波路構造（すなわち、光閉じ込め構造）中において形成される光のフィールド半径 w には、1 次元のガウシアン近似による変分法により、概ね、

$$\frac{2k_0^2 n^2 \Delta}{\sqrt{2\pi}} W w e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{w}{w}\right)^2} = 1 \quad \dots \quad (22)$$

なる条件が要求される。ここで、 k_0 は真空中の波数、n は屈折率、 Δ はピクセル部分の比屈折率差である。

一方、本光回路を構成する誘電体のピクセルを光の散乱点として考え、このピクセルによるフィールド半径 w を開口半径 w とする（図 30）。このとき、この開口からの回折角（遠視野角）を θ とすると、真空中での波数 λ を用いて、

$$\tan \theta = \frac{\lambda}{\pi w} \quad \dots \quad (23)$$

となる（図 30）。媒質中における、光の伝搬方向に垂直な向きの波数

$$\beta_1$$

と、伝搬方向の波数

β_{\parallel}

との比をとると、

$$\frac{\beta_{\perp}}{\beta_{\parallel}} = \frac{\lambda_{\parallel}}{\lambda_{\perp}} = \tan \theta = \frac{\lambda}{\pi n w} \quad \dots \dots (24)$$

が得られる。ここで、

5 λ_{\parallel}

は光の伝搬方向成分の波長であり、

 λ_{\perp}

は伝搬方向に垂直な方向成分の波長である。

ここで、光の波数（運動量と等価）の殆どは伝搬方向に集中
10 しているとして仮定すると、

$$\lambda_{\parallel} \approx \lambda$$

となり、

$$\lambda_{\perp} = \pi n w \quad \dots \dots (25)$$

が得られる。レイリー散乱の条件として、

15 $\lambda_{\perp} > 10W$

となることから、

$$W = W_c$$

となり、さらに、式（25）から、

$$w = 10W_c / (\pi n)$$

20 として式（22）に代入してwを消去すると、

$$W_c = \lambda \times \left(\sqrt[4]{\frac{1}{32\pi}} \sqrt{\frac{1}{10n\Delta}} e^{\frac{1\pi^2 n^2}{4 \cdot 10^2}} \right) \quad \dots \dots (26)$$

なる条件を得る。

式（26）の右辺のうちの括弧部分（ λ 以外の係数）は、例
えば石英系光導波路（ $n = 1.5$ 、 $\Delta = 0.01$ ）や半導体導
25 波路（ $n = 3.5$ 、 $\Delta = 0.05$ ）でも概ね1程度であるから、

$$W < W_c \sim \lambda$$

であればレイリー散乱の条件が成り立つこととなる。

図 3 1 A および図 3 1 B は、ピクセルサイズ W をパラメータとして変化させて $1.31 \mu\text{m} / 1.55 \mu\text{m}$ の波長フィルタの光回路を構成した場合の、透過損失特性および漏話特性のピクセルサイズ依存性（図 3 1 B）を説明するための図で、この光回路の光伝搬方向の長さは $600 \mu\text{m}$ であり、出力ポート a と出力ポート b の間隔は $30 \mu\text{m}$ である（図 3 1 A）。

図 3 1 B に示した結果から、ピクセルサイズ W が波長レベル程度（図 3 1 B 中に示す）以下の場合には、漏話が非常に効率よく抑えられて優れた透過損失特性が得られており、本実施例のようにレイリー散乱条件を満足するようにピクセルサイズ W を設定することが有効であることが分かる。

（実施例 1 4）

本実施例の光回路は、基板高さ方向（基板表面と垂直な方向）への光の放射を抑制することで光損失を抑制することを可能とした光回路である。

光回路の屈折率分布を高屈折率部と低屈折率部とで 2 値化して得られるピクセルパターンにおいては、低屈折率部を高屈折率部の空孔（空隙）と考えると、高屈折率部に相当するピクセル相互間に存在することとなる低屈折率部は、光導波路でいうところのクラッド部分への放射部分（導波路間のギャップ）に相当する。光回路を設計するに際しては、基板横方向（基板表面と平行な方向）への光は多重散乱により制御可能である。しかしながら、平面光回路の場合には、基板高さ方向へ漏れた光は通常そのまま放射されて（光）損失の原因となる。

図 3 2 A および図 3 2 B は平面光回路における、基板垂直方向と基板水平方向での光の閉じ込めレベルを説明するための図で、実線は基板垂直方向の光、破線は基板水平方向の光を示している。この図に示すように、基板水平方向に広がってゆく光は、光回路内で反射・散乱を繰り返しながら光回路内に閉じ込

められるが、基板垂直方向への光はそのまま光回路の外へと放射される。

図33は、最小ピクセル単位を $3\text{ }\mu\text{m}$ 角としたときの1点当たりの放射損失（結合損失）のフィールド半径依存性を説明するための図である。この図に示すように、光回路内で放射される光は光のフィールド径に大きく依存し、一般にフィールド径が小さい場合は回折の影響により大きな放射角をもつこととなる。逆にフィールド径を大きく取ることにより光の放射を抑制することが可能となり、光回路としての損失を抑制することができる。数千 μm 程度の回路サイズを仮定すると数百点の散乱点が発生する可能性があることとなるから、光回路全体としての損失を抑えるためには個々の散乱点における光損失を充分低く抑える必要がある。

石英系光導波路のような光閉じ込め効果の弱い单一モード光導波路中を伝搬する光のフィールドは、良い近似でガウス分布とすることができます。また、光のフィールドは、波面内の光の振幅の分布 $F(x, y)$ を変数分離して $F(x, y) = f(x)g(y)$ としても良い近似となる。ここで、基板平面方向を x 、基板垂直方向を y として座標を (x, y) で表してある。すなわち、光のフィールドとしてガウス分布を仮定すると、 x 方向と y 方向の各々の関数に変数分離される。

ここで、基板水平方向の関数である $f(x)$ については多重散乱により制御されて光回路内への閉じ込めが可能であるので問題ない。一方、基板垂直方向の関数である $g(y)$ については、放射された光は高屈折率領域から外れて放射損失となる。したがって、個々の散乱点における光損失を充分低く抑えるためには、 $g(y)$ 成分に起因する放射回折損失を低減させる方法を考えればよいこととなる。

$g(y)$ についてガウス分布を仮定すると、

$$g(y) = \sqrt{\frac{2}{\pi w^2}} e^{-\frac{y^2}{w^2}} \quad \dots (27)$$

と表記できる。ここで、 w はフィールド半径である。フィールド半径 w は、主として、コアの大きさと屈折率とにより制御可能であることがよく知られている。そこで、パラメータ w の制御性が高いことを前提として、個々の散乱点における光損失を充分低く抑えるために必要な条件を求める。

図32Bに「ピクセル」として示した高屈折率部が分断されて配置された場合を想定すると、高屈折率部相互間に高屈折率部のギャップが生じる。このギャップの存在により、ガウス分布を有する光のフィールドが導波路外に放射されるものとする。
この場合、光フィールドの形状のガウス分布は維持されるものの、フィールド半径が変化するとともにその波面に湾曲を生じる。この状態のフィールド分布を形式的に $g(y, z)$ と表す。ここで、 z は放射部分の距離の平均値として与えられるパラメータである。

上記ギャップ部により導波路外に放射された光フィールドのうち、再び高屈折率部へと結合する量は、次式の重なり積分で与えられる。

$$\eta = \left| \int g(y) g(y, z) dy \right|^2 = 2 \left(4 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w^2 n} \right)^2 \right)^{-1/2} \quad \dots (28)$$

ここで、 λ は光の波長、 n は高屈折率部の屈折率である。

ここで、図32Bに示した光回路の高屈折率部の高さを a とし、フィールド直径も概ねこの a と同程度であると考えて $w=a/2$ と仮定する。また、放射部分の距離の平均値を適当な係数 q により $z=qa$ とすると、ギャップひとつ当たりの、損失の期待値 $\langle \eta \rangle$ は、

$$\langle \eta \rangle = \left(1 + \left(\frac{\lambda q}{\pi a} \right)^2 \right)^{-1/2} \quad \dots (29)$$

で表される。この式(29)の値は($\lambda q/na$)で規格化できる。本発明の光回路中を伝搬する光は概ね100回程度の散乱を重ねることになるので、 $1/100\text{dB}$ 程度の損失を期待すると、

$$\frac{\lambda q}{na} < 6.8 \times 10^{-2} \approx 1/10 \quad \cdots (30)$$

5 の条件を満足すれば個々の散乱点における光損失を充分低く抑えることが可能となる。

図33は、ギャップ幅を $3\mu\text{m}$ と設定し、 $q=1$ 、 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ 、 $n=1.45$ とした場合の、高屈折率部の厚み a をパラメータとしてフィールド半径を変化させ、結合損失のフィールド半径依存性を求めた結果である。フィールド半径 $3\mu\text{m}$ (高屈折部分の膜厚 a に換算して $6\mu\text{m}$ 程度)に相当するところで充分低い損失となる結果が得られた。

(実施例15)

実施例13でも説明したように、光回路面内方向のピクセルサイズが光回路中を伝搬する光に及ぼす影響が大きい。本実施例においては、ピクセルを光伝搬方向に対して傾斜させて配置することにより、効率的な光制御を可能とした。

図34Aはピクセルを光伝搬方向に配置した光回路を説明するための図、そして図34Bはピクセルを光伝搬方向に対して傾斜させて配置した光回路を説明するための図である。図34Bのように、ピクセルを光伝搬方向に対して傾斜させて配置することとすると、光伝搬方向と垂直方向にピクセルサイズよりも短い周期の格子面が形成され、これにより効率的な光の制御が可能となる。ここで、傾斜角を45度より浅く(または深く)すればより短い周期の格子面を形成することが可能であるが、格子面を構成する反射面の中心位置の間隔が大きくなつて、反射面としての機能が低下する。とくに、本回路は数ピクセルサイズで屈折率が変化するので、その程度の距離でプラグ反射

面として機能させるためには、45度程度が適当である。

(実施例16)

これまで説明してきた実施形態では、屈折率分布を定める高屈折率部（または低屈折率部）のピクセルを仮想的なメッシュで画定される格子点上に配置することとし、かつ、屈折率分布をパターン化し易い大きさとなるように各ピクセルのサイズを限定したため、格子点間隔は各ピクセルサイズ以下とすることはできないこととなる。このため、ピクセルに関するデジタイジング誤差とピクセルエッジにおける伝搬光の散乱により、光回路特性が劣化することが生じ得る。さらに、導波路面内（xy平面内）における光の伝搬方向（x方向）と垂直な方向（y方向：光の伝搬方向に対して横方向）での屈折率の規則的な周期性が、ピクセルサイズに応じて、空間的な遮断周波数を発生させるために光の制御性も制約を受けてしまう。本実施例の光回路においては、光の伝搬方向に対する横方向において、ピクセルサイズの最小単位およびピクセル間隔の最小単位のみを条件として設定することとして、任意の位置に高屈折率部（または低屈折率部）のピクセルを配置することで屈折率分布を形成するようにした。

図35Aは仮想的なメッシュで画定された格子点にピクセルを配置して屈折率分布を形成した光回路を説明するための図であり、図35Bはかかる格子点の位置とは無関係にy方向でのピクセル配置を行って屈折率分布を形成した光回路を説明するための図である。図35Aに示した導波路においては、各ピクセルは、仮想的なメッシュで画定された格子点位置に配置されているのに対して、図35Bに示した本実施例の導波路においては、光の伝搬方向（x方向）には各ピクセルが仮想的なメッシュで画定された格子点位置に配置されているものの、光の伝搬方向に対して横方向（y方向）には、（必ずしも）各ピクセル

が仮想的なメッシュで画定された格子点位置に配置されておらず、任意の位置に高屈折率部または低屈折率部のピクセルが配置されている。

なお、本実施例の場合は、ピクセルの配置により定まる屈折率分布を、最小ピクセルサイズ（格子点間隔）よりも充分に小さい間隔を配置パラメータの最小単位として計算することとしている。そして、ピクセル同士の間隔がこの最小単位よりも大きな場合は適当な境界を定めてその境界において屈折率の値が変化するように各ピクセルに高屈折率部の値または低屈折率部の値を与える一方、ピクセル同士の間隔が最小単位よりも小さい場合にはその領域の範囲内で屈折率の平均を求めて高屈折率部の値もしくは低屈折率部の値のうちの何れか近いほうを採用することとしている。

図36Aおよび図36Bは、各々、図35Aおよび図35Bのピクセル配置に対応させて作製した実際の光回路（1.31 μm と1.55 μm の波長フィルタ）の屈折率分布を説明するための図で、これらの図の左側の図が回路全体像、右側の図が回路の一部の拡大像である。これらの図において、白い部分は高屈折率部、黒い部分は低屈折率部分であり、比屈折率差は1.5%である。また、この光回路の回路長は1200 μm とし、最小パターンルール（配置パラメータの最小単位）を3 μm とした。

図36Aと図36Bとを比較すると、本実施例の光回路においては屈折率パターンが平滑化されていることがわかる。また、図36Aに示した屈折率分布の光回路では2dBの損失があったのに対して、図36Bの屈折率分布の光回路では概ね0.5dB程度の損失改善が認められた。この事実は、本実施例の光回路のように屈折率分布を滑らかとすることにより、図36Aのような屈折率分布を有する光回路では制御不可能であった強

い散乱による損失が低減され、伝搬光の制御性が改善されたことによる効果である。具体的には、図36Aに示したような光回路では、例えばピクセルの構造が波面の進行方向に対して概ね垂直な辺を有する四角形のピクセル構造であるために、ちょうどナイフエッジにより光が回折されるように、激しい干渉が生じて光回路の設計精度が低下することに加え、大きな波数を有する光が発生して、小さな屈折率差の屈折率分布では光制御しきれなくなる。これに対して、本実施例の光回路のように、滑らかな屈折率分布を有する光回路とすることにより、光回路内での激しい干渉や大きな波数の光の発生を抑制することが可能となることによる効果である。

(実施例17)

実施例14の光回路においては、図32A、図32Bおよび図33を用いて説明したように、高屈折率部から低屈折率部へ向かう光放射を抑制するために高屈折率層の厚み a を厚くしたが、低屈折率部が長く連続する場合（すなわちギャップ間隔が長い場合）には原理的に大きな損失が発生してしまう。そこで、本実施例の光回路においては、基板に対して垂直方向での光閉じ込めを低屈折率部においても可能ならしめて、ギャップ間隔が長い場合でも低損失となる光回路の構造を提供する。

図37A～Cは本実施例の光回路の作製手順を説明するための図で、まず、通常の光導波路の作製と同様に、例えばSi基板上にコア下部となるクラッド部分（低屈折率部分）を堆積し、この低屈折率部分の上にコアに相当する第1の高屈折率層を堆積する（図37A）。ここで、低屈折率部分の屈折率を n としたとき、第1の高屈折率層の屈折率は $n(1+\Delta_2)$ である。

次に、第1の高屈折率層の一部をエッチングによりパターンニングする（図37B）。このときのパターンは、光回路の高屈折率部分と低屈折率部分に対応するパターンであり、第1の高

屈折率層がエッティングにより残される部分が光回路の高屈折率部分となる。なお、第1の高屈折率層が導波路パターンを有するように残存させれば、その残存部分に導波構造を形成することも可能である。このパターンニング工程においては、エッティングで除去される第1の高屈折率層直下にある低屈折率部分の表面部分にまで施し、当該箇所の低屈折率部分が所望の厚みとなるように後述する適当な高さでエッティングを停止する。

さらに、一定膜厚の第2の高屈折率層を堆積し、必要に応じてこの第2の高屈折率層にパターンニングを施し、第2の高屈折率層を用いて導波路形成などを実行してもよい(図37C)。第2の高屈折率層の屈折率は $n(1 + \Delta_1)$ であり、第1の高屈折率層の屈折率 $n(1 + \Delta_2)$ に比較して、 $n(1 + \Delta_2) > n(1 + \Delta_1)$ (すなわち、 $\Delta_2 > \Delta_1$)の関係がある。最後に、図示しない上部クラッドを堆積して、第1および第2の高屈折率層を埋め込む。

このようにして得られる光回路は、後述するパラメータ調整により、損失が低く、かつ、低屈折率部分を多く含む光回路でも損失増大のない光回路構造とすることが可能である。以下では、これらの高屈折率層の比屈折率差を用いて、第1の高屈折率層を「高屈折率層 Δ_2 」、第2の高屈折率層を「高屈折率層 Δ_1 」と表記する。以下、パラメータの設定方法について説明する。

既に実施例14で説明したように、光回路においてはピクセルの各界面におけるフィールド形状が同じであれば損失なく光を伝搬させることができる。以下でも、基板に対して垂直方向の光のフィールド分布のみに着目して説明する。

図38に示すように、高屈折率層 Δ_2 をエッティング除去した領域を「低屈折率領域」、高屈折率層 Δ_2 をエッティング除去せずに残存させた領域を「高屈折率領域」と呼ぶとすると、高屈折

率領域においては、高屈折率層 Δ_1 と高屈折率層 Δ_2 との和に相当する「導波路コア」に相当する部分の厚みが、低屈折率領域に比較して厚くなっている。導波路中を伝搬する光フィールドは、導波路全体に分布して伝搬するほうが運動エネルギーを低く抑えられる。従って、上述の高屈折率領域は、光フィールドの分布を導波路全体に広げて運動エネルギーを低くする作用がある。
一方、光フィールドの位置エネルギーに着目すると、高屈折率層 Δ_2 と高屈折率層 Δ_1 とでは、高屈折率層 Δ_2 の屈折率のほうが高いために、光フィールドは高屈折率層 Δ_2 に集中するほうが位置エネルギーは低くなるため、できるだけ高屈折率層 Δ_2 に集中しようとする傾向がある。このように、光フィールドを導波路全体に広く分布させる作用と導波路の一部に集中させようとする作用とが競合することになる。さらに、高屈折率層 Δ_2 に集中させようとする作用は、光フィールドの中心位置を基板側にシフトさせるように働く。このような光フィールドのエネルギー最小化に起因する性質を利用して、高屈折率領域中の光フィールドが、低屈折率領域中の光フィールドと同じフィールド半径でかつ中心位置が同じになるように、パラメータを調整すればよい。

図39は本実施例におけるパラメータ調整のための計算例を説明するための図で、この場合のパラメータは、図39に示したように、既に説明したn、 Δ_1 および Δ_2 の他に、高屈折率層 Δ_1 の膜厚 W_1 、高屈折率層 Δ_2 の膜厚 W_2 、高屈折率層 Δ_2 の層上面から低屈折率領域のフィールド中心位置までの距離 x_c 、
フィールド半径w、光の波長 λ （すなわち、波数 $k_0 = 2\pi/\lambda$ ）である。通常は、屈折率nと波長 λ は回路設計時には決まっているので、残りの6個のパラメータを決定することになる。ここでは、これらのパラメータを変分法を用いて求める。また、便宜のため、添字fillおよびgapを用い、高屈折率領域における

る波動関数を u_{full} 、低屈折率領域における波動関数を u_{gap} 、などと表記する。

高屈折率領域における波動関数 u_{full} は、次式（3 1）で与えられ、

$$5 \quad u_{full}(x) = \begin{cases} u_1 = -2k_0^2 n^2 \Delta_1 & (-W_1 < x < 0) \\ u_2 = -2k_0^2 n^2 \Delta_2 & (0 < x < W_2) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases} \dots (3 1)$$

また、高屈折率領域における波動関数 u_{full} は、次式（3 2）で与えられる。

$$u_{gap}(x) = \begin{cases} u_1 = -2k_0^2 n^2 \Delta_1 & (-W_2/2 < (x - x_c) < W_1/2) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases} \dots (3 2)$$

波動方程式を近軸光線近似して得られるフレネル方程式

$$10 \quad H_j = -\left(\frac{\partial}{\partial x}\right)^2 + u_j(x) \quad (j = full, gap) \dots (3 3)$$

について、フィールド半径 w および高屈折率層 Δ_2 の層上面から低屈折率領域のフィールド中心位置（センター位置）までの距離 x_c を決める変分方程式を以下のように立てて演算を進めると、最終的には、次式（3 7）のように 3 つの方程式が導出される。

$$g(x - x_c) \equiv \sqrt[4]{\frac{2}{\pi w^2}} \exp\left[-\left(\frac{x - x_c}{w^2}\right)^2\right] \dots (3 4)$$

$$R_{gap} \equiv \int_{-\infty}^{\infty} g(x - x_c) H_{gap} g(x - x_c) dx = \frac{1}{w^2} + u_1 \operatorname{erf}\left(\frac{W_1}{\sqrt{2}w}\right) \dots (3 5)$$

$$\begin{aligned} R_{full} &\equiv \int_{-\infty}^{\infty} g(x - x_c) H_{full} g(x - x_c) dx \\ &= \frac{1}{w^2} + \frac{1}{2} \left[u_1 \operatorname{erf}\left(\sqrt{2} \frac{W_1 + x_c}{w}\right) + u_2 \operatorname{erf}\left(\sqrt{2} \frac{W_2 - x_c}{w}\right) + (u_2 - u_1) \operatorname{erf}\left(\sqrt{2} \frac{x_c}{w}\right) \right] \end{aligned} \dots (3 6)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial R_{gap}}{\partial w} &= 0 \\ \frac{\partial R_{fill}}{\partial w} &= 0 \quad \cdots \quad (37) \\ \frac{\partial R_{fill}}{\partial x_c} &= 0\end{aligned}$$

この結果は丁度、フィールド半径 w が同じで、適当なセンタ位置 x_c があるという条件式に相当する。従って、結果的には、残り 3 つのパラメータを与えることにより光フィールドの系が決定されることとなる。

図 4 0 は、本実施例の光回路である $1.31/1.55 \mu m$ WDM 回路の特性（透過損失の波長依存性）を説明するための図である。なお、ここでは、 $\Delta_1 = 1.5\%$ 、 $\Delta_2 = 2\%$ 、 $W_1 = 5.5 \mu m$ と設定してある。また、低屈折率領域が全回路面積に占める割合を約 50 % とし、回路長は $1200 \mu m$ とした。比較的多くの高屈折率領域と低屈折率領域との界面、および、連続した低屈折率領域が含まれている光回路であるが、図 4 0 にあるように、約 $2 dB$ という良好な透過損失が得られた。

(実施例 18)

本発明の光回路を製造するに際しては、従来から一般的に用いられてきている通常のプロセスによることのほか、近年開発された手法であるところの、光照射によって屈折率や構造を変化させる手法を光回路製造プロセスの一部に採用することも可能である。本実施例では、このような光照射を用いた光回路作製の幾つかの実施例について説明する。本実施例によれば、通常用いられているプロセスと比較して、製造工程数を大幅に低減する事ができることのほか、所望の構造を容易に作製できるという効果が得られる。

(実施例 18-1)

図 4 1 A および図 4 1 B は、本実施例の第 1 の形態の光回路

の製造方法を説明するための図で、まず、シリコン基板 21 上に、火炎堆積法（FHD 法）により、下部クラッド層 22、コア層 23、上部クラッド層 24 を順次形成した（図 41A）。下部クラッド層 22 および上部クラッド層 24 としては、石英ガラス (SiO_2) をベースとする母材料に B や P などの酸化物をドーピングさせた材料を用いている。コア層 23 としては、B や P などの酸化物の不純物に加え、Ge の酸化物をドーピングした材料を用いている。このような材料選択により、下部クラッド層 22 および上部クラッド層 24 よりもコア層 23 の方が高い屈折率をもつよう設定してある。また、下部クラッド層 22 の厚さを $20 \mu\text{m}$ 、コア層 23 の厚さを $7 \mu\text{m}$ 、上部クラッド層 24 の厚さを $10 \mu\text{m}$ とした。なお、上部クラッド層 24 は UV 光を照射したときの回折広がりを抑えるために、通常の光回路の構造に比較して若干薄い厚みとなるように設計した。

次に、上部クラッド層 24 の上に、図 41B に示すような光照射用の遮光膜としてのシリコン薄膜 25 を形成した後、感光性レジストでパターンを形成し、ドライエッチングプロセスによりシリコン膜を部分的に除去することでパターン形成を実行した（図 41B）。なお、感光性レジストはシリコンパターン形成後に除去されている。また、この遮光マスクパターンの形成に際しては、所望の回路特性を得るために必要とされる屈折率パターンが最終的に得られるように、プロセス依存性や照射光の広がりを考慮して、かかるプロセス依存性等を考慮せずに得られるコア形状の設計値に若干の補正が加えられている。

次に、光感受性を向上させるため、高圧水素雰囲気中でサンプル中への水素拡散を実行した。具体的には、密閉容器中にサンプルを設置し、室温にて 150 気圧の水素雰囲気中に一週間放置した。

この水素拡散に続いて、ArFエキシマレーザを用いて波長193nmのUV光を照射することにより、照射前の屈折率よりも大きな屈折率を有するようにコア層23部分の屈折率を変化させた。図41B中に斜線で示した領域(23')がレーザ照射により屈折率変化を生じた領域である。このときの照射パワーは120mJ、照射時間は10分である。光照射後に遮光膜をエッチングにより除去した後に、熱処理を施し、サンプル中に拡散させた水素を除去するとともに、光照射により生じたガラスの不安定状態を解消することにより屈折率の安定化を図った。

このようなプロセスにより、遮光マスク25が形成されなかった領域のコア層の屈折率を選択的に変化させ、遮光マスク25を形成した領域のコア層の屈折率とは異なる屈折率とすることができます。このような屈折率変化の程度は、リファレンスとして設定した広い照射領域の測定から、約0.3%程度と推定される。

上述の製造工程により、(1×4)の分岐回路を作製した。回路設計から期待される特性に比較して2dB程度の大きな損失特性ではあったものの、基本的な分岐動作が確認された。損失特性が設計値からはずれた原因是、屈折率変化量が設計値とは異なっていたことによるものと考えられる。

なお、上述した製造方法はあくまでも一例を示したものに過ぎない。製造工程として、下部クラッド層22、コア層23および上部クラッド層24の形成工程、遮光マスク層25の形成工程、および、光照射工程を含んでいることが必須の要素であるが、これらの必須工程を含めて各工程に関しては様々な変更を加えることが可能であることはいうまでもない。例えば、下部クラッド層22、コア層23、上部クラッド層24の形成には、CVD法やスパッタ法あるいはスピンドルコート法などの成膜

方法を用いることも可能である。また、図41Aおよび図41Bに示した例では、各層は単一組成の材料で構成されるものとしたが、組成の異なるガラスを複数枚重ね合わせて堆積を行つて得られる多層構造の層を1つの層として取り扱うこととしても構わない。

遮光マスク層25としては、照射する光を遮蔽する効果のある材料であれば、シリコン以外の別の材料を用いても構わない。また、遮光用のマスクの形成方法の一例として、上部クラッド層24に形成する方法をあげたが、別のガラス基板上にマスク形成を行い、このガラス基板をサンプルに密着させて光照射することによっても同様の結果を得ることができる。さらに、光感受性を向上させるための手法については、高圧下での水素添加方法によることの他に、高温で短時間の水素処理や、重水素を添加するなどの手法によることも可能である。また、照射光として、193nmのUVエキシマレーザ光のほか、KrFエキシマレーザやXeFエキシマレーザ等の他のレーザからの光や、短パルスの可視光レーザ光などを用いても、上記と同様の光回路構造を作製することができる。

(実施例18-2)

図42Aおよび図42Bは、本実施例の第2の形態の光回路の製造方法を説明するための図である。この実施形態は第1の実施形態(実施例18-1)とほぼ同じであるので、相違する部分についてのみ説明を行う。第1の実施形態においては、下部クラッド層22および上部クラッド層24にはGeの酸化物をドーピングしないこととしたので、光照射した際の上部クラッド層24および下部クラッド層22における屈折率変化はないか、若しくは、ほとんど無視できる程度となる。これに対して、本実施形態では、これらの層もコア層23と同様に感光層となるように、Geドープされたガラス組成で上部クラッド層

24および下部クラッド層22を形成することとし、光照射による屈折率変化が誘起されることとしている。

第1の実施形態と同様に、下部クラッド層22、コア層23、上部クラッド層24を順次形成し（図42A）、上部クラッド層24の上に光照射用の遮光膜としてのシリコン薄膜25を形成してパターン形成する（図42B）。遮光マスク25でマスキングされていない領域が光照射されると、コア層23のみならず上部クラッド層24および下部クラッド層22も感光し、Geドープ量に応じた屈折率変化が生じる。図42B中に斜線で示した領域（23'）がレーザ照射により屈折率変化を生じた領域である。上述の製造工程により、（1×4）の分岐回路を作製した結果、第1の実施形態の分岐回路よりも優れた損失特性が得られることが確認された。

すなわち、コア層23およびクラッド層（22および24）の双方が感光層となるように組成選択することにより、光照射により形成された高屈折率領域と低屈折率領域における光伝播方向でのフィールド分布の差分が少なくなり、素子の損失特性を改善することができる。

（実施例18-3）

図43A～Dは、本実施例の第3の形態の光回路の製造方法を説明するための図である。この実施形態は第1および第2の実施形態（実施例18-1および実施例18-2）を併用するものに相当している。従って、以下では、これらの実施形態に追加される工程部分についてのみ説明を行う。

本実施形態においては、位相マスクを用いたUV光照射により局所的な屈折率変化を生じさせ、図43Dに示すような（1×2）分岐回路を作製した。位相マスクを用いたUV光照射方法は、ファイバーグレーティングなどの製造において用いられているものであり、グレーティング構造などのような、周期的

かつ微細な構造を比較的容易かつ正確に作製することができるという利点がある。また、複数の位相マスクを用いることにより、ある程度の複雑な構造であっても比較的容易に製造が可能である。しかし、本発明の光回路のように構造が複雑であると、
5 位相マスクを用いたUV光照射のみによって所望の屈折率分布を完全に実現することは困難となるため、第1および第2の実施形態で説明した製造方法などと併用して用いることが必要となるのである。

第1の実施形態と同様に、下部クラッド層22、コア層23、
10 上部クラッド層24を順次形成し(図43A)、上部クラッド層24の上に光照射用のパターン化された遮光マスク25を形成してUV光照射を実行した(図43B)。図43B中に斜線で示した領域(23')がUV光照射により屈折率変化を生じた領域である。遮光マスク25を除去した後に、図43Dに示すように、出力ポート近傍の一部領域に、グレーティングフィルタの形成を行う。具体的には、グレーティングフィルタを形成したい領域(図43D中の27に相当)の出力ポート近傍に、図43Cに示すようにパターン化された位相マスク26を形成し、この位相マスク26を介してUV照射を実行してコア層2
15 3内の所望領域23''を感光させてグレーティングフィルタとする。この工程の後に、実施例7-1と同様の工程により熱処理を行い、サンプル中に拡散させた水素を除去するとともに、光照射により生じたガラスの不安定状態を解消して屈折率の安定化を図った。
20

25 グレーティングを追加形成した出力ポート(図43Dの27で示す領域の出力ポート)においては、そのフィルタ動作により、透過波長特性が変化することが確認された。なお、本実施例では、実施例18-1の製造工程途中に、図43Cに相当するUV光照射工程を割り込ませて製造の簡略化を図っているが、

実施例 7-1 の工程を全て完了した後に、上記図 43C に相当する UV 光照射工程を実施するようにしてもよい。

(実施例 18-4)

図 44A および図 44B は、本実施例の第 4 の形態の光回路の製造方法を説明するための図で、この実施形態においても、実施例 18-1 と同様に、シリコン基板 21 上に、下部クラッド層 22、コア層 23、および、上部クラッド層 24 を、火炎堆積法 (FHD 法) により順次形成した (図 44A)。

これに続いて、上記各層を形成したウエハを、図示しない XYZ 方向 3 軸の可動ステージ上に固定し、レンズ 29 によりレーザ光 28 をコア近傍に集光させて光照射を行い、照射点付近の屈折率を変化させた (図 44B)。図 44B 中に斜線で示した領域 (23') がレーザ照射により屈折率変化を生じた領域である。この図に示したように、屈折率変化した領域の大きさは一定ではなく、所望の屈折率分布が実現されるように、個々の領域の大きさを決定することができる。

これらの領域の横方向 (XY 方向) の広がりは、レーザ光照射中のステージの XY 平面内の駆動量やレーザパワー量により決定される。一方、縦方向 (Z 方向) の広がり (厚み) は、レーザパワー量の制御とステージの Z 方向での駆動量によってレーザ光 28 の集光状態を制御することにより決定され、コア層 23 と同じ厚みを有するようにしたり、コア層 23 よりも薄い或いは厚い厚みとすることが可能である。また、照射領域の屈折率変化量は、主としてレーザパワー量の制御により行われる。なお、この実施形態では、レーザ光として 775 nm の波長のフェムト秒パルスレーザを用い、パルス幅は 150 fs である。このようにして (1 × 4) の分岐回路を製造し、基本的な分岐動作を確認した。

上述した手法によりレーザ光を集光描画して屈折率の空間的

分布を実現する場合には、予めマスク形成などを行う必要性がないという特徴を有しているが、各ドット毎にレーザ光照射を行う必要があるため、光回路の作製に時間がかかる傾向がある。このため、本手法を、上述の実施例 18-1 または実施例 18-2 で説明した、一括描画による屈折率分布形成方法と併用することが有効である。

また、レーザ光としては、フェムト秒レーザに限らず、UV エキシマレーザ光や CW の UV レーザ光などを用いることも可能である。この場合も、実施例 18-1 で説明したように、大きな屈折率変化を得るために、水素添加などを用いて UV 光に対する増感を行うこととすることが効果的である。

さらに、本実施例では、下部クラッド層 22、コア層 23、および、上部クラッド層 24 の 3 層構造とされているが、本手法はレーザ光の集光点付近の屈折率変化を利用していているので、バルクガラスのような単一組成の材料に適用することも可能である。

(実施例 18-5)

上記実施例 18-1 および 18-2 で説明した手法により光回路を作製した例を説明する。

図 45 A～C は、作製した光回路の屈折率分布の様子を説明するための導波路断面図で、図 45 A は光照射前の屈折率分布、図 45 B は実施例 18-1 の手法により形成した屈折率分布、そして、図 45 C は実施例 18-2 の手法により形成した屈折率分布の様子である。なお、これらの図において、屈折率分布ピクセルサイズは $3 \times 3 \mu\text{m}$ であり、コア層の厚みは $4.5 \mu\text{m}$ である。

図 45 A～C に示す何れの屈折率分布においても、高屈折率部分と低屈折率部分は同等の有効屈折率差（高屈折率部分： $\Delta = 1.5\%$ 、低屈折率部分： $\Delta = 1.3\%$ ）を有しており、直

接比較することが可能である。

図46は、図45A～Cで示した構造を有する、 $1.31\mu m / 1.55\mu m$ の(1×2)分岐回路の各々の損失特性(透過率)を説明するための図である。なお、回路サイズは $120\mu m \times 120\mu m$ である。図45Aに対応する構造(従来構造)の光回路の特性を破線で示し、図45Bおよび図45Cに対応する構造の光回路特性を、それぞれ、(B)および(C)で示してある。

この図からわかるように、本発明の光回路の損失特性は、従来構造の光回路の損失特性に比較して、約1dB程度の改善が認められ、特性良好な光回路が得られている。

(実施例19)

本実施例では、屈折率を複素屈折率として取り扱う。複素屈折率の虚部は、媒質中における光の利得若しくは損失を意味する。従って、波動伝達媒質は、吸収または增幅効果を有するものであるものとする。本実施例の光回路においては、通常材料の複素屈折率が波長に依存して変化するという特徴を有効に利用したものである。なお、光回路構造としては、実施例2で説明した $1.31\mu m / 1.55\mu m$ の(1×2)分波回路の例を考える。

図47A～Cは、本実施例の光回路の構成を説明するための概略図で、図47Aは回路全体の概念図であり、図47Bおよび図47Cは出力側における複素屈折率分布の概念図であり、これらの図はそれぞれ、 $1.31\mu m$ 用ポート(図中a)および $1.55\mu m$ 用ポート(図中b)の近傍の複素屈折率分布の様子を示している。

この光回路は、通常の回路設計に加えて、 $1.31\mu m$ の出力ポート近傍の複素屈折率分布を、 $1.31\mu m$ 帯の光に対してはほぼ透明で、かつ、 $1.55\mu m$ 帯の光に対しては大きな

損失を有するように設計（図 47B）する一方、1.55 μm の出力ポート近傍の複素屈折率分布を、1.55 μm 帯の光に対してはほぼ透明で、かつ、1.3 μm 帯の光に対しては大きな損失を有するように設計している（図 47C）。すなわち、
5 この光回路においては、出力させたい波長の信号光については透明であり、かつ、不要な信号光は光回路内で吸収させて出力されないように複素屈折率分布が決定されている。

詳細な図示はしないが、1.31 μm の出力ポート（a）と
10 1.55 μm の出力ポート（b）との間には、両方の波長の光
に対して大きな損失を有するように複素屈折率分布が与えられ
ており、不要な信号光が散乱することにより生じるクロストークを防ぐ設計となっている。本実施例の光回路の構成材料と
しては半導体ドープガラス系材料が選択されており、これにより、
光に対して透明な材料のみで光回路を作製した場合に比較して、
15 1.55 μm の出力ポートに対する 1.3 μm 帯の信号光のクロストークが大きく減少した。また、1.31 μm の出力ポートに対する 1.55 μm 帯の信号光のクロストークも若干減少した。なお、信号光の損失の増加は殆ど認められなかった。また、実数のみの屈折率分布を与えた光回路と、複素屈折率分布
20 を与えた本実施例の光回路とを比較すると、同一の回路特性を得るために回路長を短くすることが可能となる。

なお、本実施例では、回路を構成するに際して半導体材料を用いることとしたが、複素屈折率を与える材料であればよく、
25 有機材料、金属、誘電体材料など様々な材料を用いることができる。

本発明の回路においては、多重の回折・干渉現象を利用して
いるため、極めて多彩な機能を実現できるという特長を有して
いるが、実数のみの屈折率分布で充分な回路特性を実現するこ
とが困難な場合も生じ得る。そのような場合に、本実施例のよ

うに、回路の一部もしくは全ての領域において、複素屈折率分布を与えるように設計することとすれば、回路特性を改善したり、あるいは、素子長の短い回路を作製することが可能となる。

(実施例 20)

5 本実施例の光回路は、これまで説明してきた光回路の高屈折率部分と低屈折率部分として、レリーフ状に屈折率の高い層を加工することで屈折率分布を形成した回路である。

図 48 A～C は、本実施例の光回路の構成を説明するための断面図で、図 48 A は本光回路を構成する基本的な構造であり、
10 低屈折率層であるクラッド層 (22、24) に挟まれた高屈折率層である厚み $5 \mu\text{m}$ のコア層 23 の上部の一部を $2 \mu\text{m}$ の深さ分だけ除去してレリーフ状のパターニングを施すことにより、実効的な「高屈折率部分」 23a と「低屈折率部分」 23b とを形成することで屈折率分布を形成している。

15 このようなパターン形成は、反応性イオンエッチングにより実行可能である。一般に、エッチングによるパターン形成では、その加工深さが深いほどパターン変形の度合いが大きくなってしまってパターン形成の制御性が低下するため、深いエッチングを施すこととすると形成可能なパターンサイズは大きくならざるを得ないという問題がある。発明者らは、本発明の光回路においてはエッチングにより形成されるパターンサイズは極めて重要なパラメータであることを見出した。これは、パターンサイズにより決定される空間的屈折率分布が光の制御性に影響を与え、ひいては光回路の特性そのものに影響を与えることになるため
20 25 である。

そこで、パターンサイズの制御性を高めてより小さいサイズのパターンの形成を可能とするために、以下に説明するような方法により、比較的浅いエッチング深さのレリーフ状のパターンングを施して所望の屈折率分布を実現することとした。図 4

8 B は、その一例を説明するための図で、図 4 8 A の構造では高屈折率層であるコア層 2 3 の一方の面からのみ凹凸を形成しているのに対して、この図に示した構造では、コア層 2 3 の両面から凹凸を形成し、これにより、個々の凹凸に施すエッチング深さを $1/2$ の $1 \mu m$ として同等の屈折率分布を実現したものである。

図 4 8 B に示した回路構造を作製するには、先ず、図示しないシリコン基板上に下部クラッド部分として低屈折率のガラスを堆積し、その一部に反応性イオンエッティングにより溝を形成して下部クラッド層 2 2 とする。後述するように、この溝の部分が本光回路のコア層 2 3 の高屈折率部分に相当することとなる。ここでは、高屈折率層であるコア層 2 3 のクラッド層（2 2、2 4）に対する比屈折率差 Δ を 1.5% とし、最終的に得られるコア層 2 3 の高屈折率部分の厚みが $5 \mu m$ となるように設計しているので、この層厚に対して十分なステップカバレッジが得られるように約 $1 \mu m$ の溝を形成している。

下部クラッド層 2 2 に対する溝形成に続いて、下部クラッド層 2 2 上に高屈折率のガラスの層を堆積して高温で加熱する。この加熱により、下部クラッド層 2 2 の溝の両端近傍（段差部分）にも高屈折率ガラスが隙間なく充填され、かつ、高屈折率層の表面も平坦化される。なお、この高屈折率ガラスの堆積は、本光回路のコア層 2 3 の高屈折率部分に相当することとなる溝上の高屈折率ガラス層の厚みが $6 \mu m$ となるように実行される。

ここで、高屈折率ガラス層の厚みを $6 \mu m$ とするのは、この高屈折率ガラス層の上表面にエッティングにより溝を形成して、最終的な高屈折率部分の厚みが $5 \mu m$ のコア層 2 3 を得るために、エッティングによる「とりしろ」を $1 \mu m$ としたことによる。

高屈折率ガラス層の表面に形成する溝は、図 4 8 B に示すように、下部クラッド層 2 2 に設けた凹部（凸部）が高屈折率ガ

ラス層の凸部（凹部）となるように、すなわち、コア層23の表面と裏面に形成される低屈折率部分と高屈折率部分が互いに対応する位置に設けられるように形成される。これは、コア層23中を伝搬する光のフィールドの形状が光伝搬方向に伸びる直線に対して対称であるため、余分な損失を回避するためには、コア層23の表面と裏面に形成される低屈折率部分と高屈折率部分も光伝搬方向に伸びる直線に対して対称であるべきであるという発明者らの知見に基づくものである。

このようなレリーフ状パターンのコア層23を形成した後に、導波部分であるコア層23の上部に上クラッド層24を設け、高屈折率部分23aと低屈折率部分23bとを有するコア層23が上下のクラッド層に埋め込まれた構造とし、上述の実施例2同様、 $1.31/1.55\mu\text{m}$ WDM光回路とした。

従来、クラッド層とコア層の比屈折率差 Δ が1.5%程度の光導波路の場合には、基板厚み方向に单一モードにするために、コアの膜厚を約 $4.5\mu\text{m}$ 程度の厚みとするため、同程度の通常の半導体プロセスにおけるエッチング深さ約 $1\mu\text{m}$ と比較して、かなり深いエッチングが必要で微細パターンを加工するのが困難であった。これに対して、本実施例の光回路のようにレリーフ状の構造とすることで、エッチングの深さを $1\mu\text{m}$ と浅くして $0.5\mu\text{m}$ 程度の微細なパターン化が可能となった。

図48Bに示した構造を有する光回路では、コア層23の高屈折率部分と低屈折率部分の有効屈折率差 Δ' は、計算上、クラッドを形成する低屈折率ガラスとコアを形成する高屈折率ガラスの比屈折率差 Δ （約1.5%）の約20%程度と見積もられ、本実施例の光回路の空間屈折率分布を形成するための有効屈折率差 Δ' は、僅かに約0.3%となる。

この有効屈折率差 Δ' （約0.3%）をもとに光回路を設計した結果、ピクセルサイズを $3\mu\text{m}$ と設定した場合であっても、

比屈折率差 Δ 1. 5 %で設計した実施例 1 の光回路と比較して僅かに 1. 5 倍程度の長さの回路長におさめることができた。また、本実施例の光回路においては、ピクセルサイズを 0. 5 μm にまで小さく設定することが可能であり、ピクセルサイズ 0. 5 μm で光回路を設計すれば横方向への大きな波数の光フィールドを発生させることが可能となり、実施例 1 の光回路と比較して約半分の回路長とすることができます。

すなわち、本実施例の光回路では、例えば 0. 3 % 程度の低い屈折率差で光伝搬領域を形成したとしても、レリーフ状のパターンを有する導波路構造による多重散乱を利用して比較的大きな反射・散乱を発生させることができるとなり、高効率で光干渉を生じさせ得る。このため、光回路を大幅に小型化することが可能である。

なお、コア層 2 3 に設けるレリーフの形状は、所望する屈折率分布に応じて自由に変更が可能であり、例えば、図 4 8 C に示すように、コア層 2 3 の上下面で異なるパターンを有するようにするにして、高屈折率部分 2 3 a と低屈折率部分 2 3 b に加え、中間屈折率部分 2 3 c を設けるようにしてもよい。

既に実施例 1 6 において説明したように、図 3 6 A に示したような光回路では、ピクセルの構造が波面の進行方向に対して概ね垂直な辺を有する四角形のピクセル構造であるために、ちょうどナイフエッジにより光が回折されるように、激しい干渉が生じて光回路の設計精度が低下することに加え、大きな波数を有する光が発生して、小さな屈折率差の屈折率分布では光制御しきれなくなるという問題が生じ得るが、コア層 2 3 に上述のレリーフ状パターンを施すこととすれば、高屈折率を有するピクセル相互間に介在する低屈折率を有するピクセルの存在により、屈折率パターンが実効的に平滑化されて、伝搬光の激しい散乱を抑制することが可能となる。

(実施例 2 1)

本実施例の光回路は、屈折率の異なる膜を多層に積層させた多層膜によりクラッドを構成することで光閉じ込めを実現したものである。

5 図 4 9 は、本実施例の光回路の導波路部分の断面図で、コア層 2 3 を挟む下部クラッド層 2 2 および上部クラッド層 2 4 は、何れも、屈折率の異なる膜（2 2 a～d および 2 4 a～d）を多層に積層させた多層膜で構成されている。

これまで説明してきた光回路においては、低屈折率部分のフィールドパターンは、通常は、実施例 2 の光回路のように放射的となり、実施例 1 7 や実施例 1 9 のような回路構成としても、原理的に損失が発生してしまう。本実施例の光回路は、この問題を解消すべく、クラッドを屈折率の異なる膜を多層に積層した多層膜とすることで、基板の上下に漏れる光を完全に抑制するようにしたのである。なお、光回路の設計方法は “Dispersion and radiation loss characteristics of antiresonant reflecting optical waveguides-numerical results and analytical expressions” (T. Baba and Y. Kokubun, Quantum Electronics, IEEE Journal of, Vol. 28 No. 7, pp 1689 -1700 July (1992)) に記載されているものと同様である。

20 屈折率が互いに異なる媒質を多層に組み込むこととすると、全反射や無反射条件が実現可能となる。特に、横方向の波数が小さい場合には、比較的容易に全反射条件を形成することが可能である（例えば、T. Baba and Y. Kokubun, “Dispersion and radiation loss characteristics of antiresonant reflecting optical waveguides-numerical results and analytical expressions”, Quantum Electronics, IEEE Journal of, Vol. 28 No. 7, pp 1689 -1700 July (1992) 参照）。

したがって、クラッド層を上記多層膜で構成し、低屈折率領

域においてコア層 23 の上下側両面において全反射（もしくは充分に高い反射率）が得られるようにこれらの層を配置することにより、低屈折率領域と高屈折率領域の割合が同程度とされた光回路においても、充分に低損失の回路を実現することが可能となる。

このような回路構成は、（図示しない）基板の上下方向にのみプラグ条件を満足すれば効果が得られるため、図 49 に示した構成のように基板上下方向のみに周期構造をもたせた多層膜構造とすることのほか、フォトニック結晶を用いて上下のクラッド層を構成することによっても同様の効果を得ることができる。

（実施例 22）

本実施例の光回路は、1つのピクセルを複数のサブピクセルに分割して屈折率分布を設計し、実施例 14 で説明した回路よりも低損失の光回路を実現するものである。

一般に、大雑把な近似として、光がその波長よりも小さな構造を有する物体と相互作用する際には、回折現象のために、波長程度の大きさの領域において平均化された屈折率を、実効的な屈折率として感受する。したがって、単位ピクセルを構成する複数のサブピクセルにおいて、高屈折率を有するサブピクセル数と低屈折率を有するサブピクセル数との配分の仕方によって、実効的な屈折率が異なる単位ピクセルを任意に作り出すことができる。

図 50A および図 50B はそのようなサブピクセルの例を示す上面図であり、図 50C はサブピクセルにより分割されたピクセルを用いて屈折率分布を設計した光回路の一部の上面概念図である。単位ピクセルは $1 \mu m$ 角の大きさであり、このピクセルを 2 分割する場合（図 50A）と 4 分割する場合（図 50B）について例示している。このようなピクセル分割によって、

ギャップの実効値は約 $0.5 \mu\text{m}$ (図 50A の場合) または $0.25 \mu\text{m}$ (図 50B の場合) となり、このような媒体中を伝搬する光はギャップの存在を殆ど感受することがなくなる。また、屈折率分布を設計するに際しても、計算に必要なデータ量を例えれば $1/2$ や $1/4$ とすることが可能となるため、1 万ピクセル \times 1 万ピクセル (この場合には、1 cm 角に相当する) 程度の大規模な回路であっても容易に形成することができることとなる。

本実施例の光回路においては、ピクセルを複数のサブピクセルに分割するが、屈折率分布の設計に際してはピクセル単位で計算を実行することにより、屈折率分布の計算を容易化している。また、微細パターンを実現する場合に、サブピクセルによる分割状態が同じ単位ピクセルを多用して計算を行うことすれば、フォトプロセスにおける位相シフトマスクなどによる回折補正工程やプロセスによるエッチング量の補正工程における補正条件設定などが容易化される。

(実施例 23)

既に実施例 16において説明したように、図 36A に示したような光回路では、ピクセルの構造が波面の進行方向に対して概ね垂直な辺を有する四角形のピクセル構造であるために、ちょうどナイフエッジにより光が回折されるように、激しい干渉が生じて光回路の設計精度が低下することに加え、大きな波数を有する光が発生して、小さな屈折率差の屈折率分布では光制御しきれなくなるという問題がある。

この問題を解決するために、本実施例の光回路では、ピクセル形状をこれまでの矩形から変形させた形状としている。このようなピクセル形状の変形の態様としては、基板に水平な方向に変形させる場合と基板に垂直な方向に変形させる場合がある。なお、屈折率分布を計算する際には、実施例 11 と同様に、

実効的な屈折率の差を有する高低 2 つの屈折率を仮定すればよい。

図 5 1 A は、基板に対して水平な方向に屈折率が変化する構造を有する導波路の屈折率分布の概念図であり、図 5 1 B は、
5 図 5 1 A に示す屈折率分布中に平面波を伝搬させた際の反射減衰の様子を説明するための図である。なお、図 5 1 B の横軸は屈折率の勾配（伝搬定数の空間的な変化の割合）であり、縦軸は伝搬定数不整合による反射減衰量である。空間的な長さは媒体中での光の波長で規格化することとし、かつ、各場所の屈折率を基準屈折率（ $n = 1.45$ ：波長 $1.55 \mu m$ における石英系導波路の屈折率）で規格化して比屈折率差を求めている。
10

これらの図からわかるように、屈折率の勾配を 1 よりも小さくすることで反射減衰量が改善される。すなわち、ピクセルの形状を徐々に変化させればよい。例えば、 $3 \mu m$ 角の屈折率分布のピクセルを仮定すると、このピクセルサイズは、真空中の波長が $1.55 \mu m$ の光に対して約 2 波長程度の大きさであるから、勾配が $1/2$ 程度となるように屈折率を変化させると、散乱を数 dB 程度減衰させることができると予想される。
15

図 5 2 A は、ピクセル形状を円形とした場合の単位ピクセルにおける屈折率分布の様子を説明するための概念図、図 5 2 B は、図 5 2 A に示した円形ピクセルを用いて構成した回路の一部の上面概念図、そして、図 5 2 C は、図 5 2 B における高屈折率部と低屈折率部の配置を逆転させた場合の回路の一部の上面概念図である。

25 フィールドの広がりの程度をピクセルサイズと同程度と仮定すると、局所的な実効屈折率は概ね円形ピクセルの断面積に比例して変化すると考えられる。ここでは、直径約 $3 \mu m$ の円形領域を、クラッドと同じ屈折率とし、その円形領域の周囲を高屈折率の膜で形成している。つまり、図 5 2 B に示した回路は、

高い屈折率を有する膜からなる高屈折率部が一様に形成され、この高屈折率部の一部領域を円形にくりぬいてその部分に低屈折率部を設けた構成となっている。これとは逆に、図 52C に示した回路は、低い屈折率を有する膜からなる低屈折率部が一様に形成され、この低屈折率部の一部領域を円形にくりぬいてその部分に高屈折率部を設けた構成となっている。

基板に対して垂直方向に屈折率が変化する回路構成の場合には、先ず、基板にアンダークラッドを堆積した後、屈折率がクラッドよりも高い膜を堆積する。フォトレジストをマスクとして用いた反応性イオンエッティングによってコアのパターン形成を行う場合には、マスクであるフォトレジストの厚みを空間的に変化させることにより、厚みの異なる膜をコアとして残すことができる。例えば、フォトレジストを塗布後、約 130℃ に過熱してレジストを溶融させ、表面張力によりパターンのエッジを丸め、この状態のレジストをエッティングマスクとして用いることとすれば、レジストパターン周囲はエッティングによって削られて、最終的に高屈折率膜に転写されるパターンもパターン外周部分が丸められたパターンとなる。

なお、例えば、AZ 系のフォトレジストを用いることとすれば、露光量に概ね比例する深さのレジストを除去することが可能である。従って、異なるパターンを複数回に分けて露光することとすれば、最終的には所望のパターンを形成することが可能である。この場合にも、最終的に得られるパターンの外周部分を滑らかにすることができる。

25 (実施例 24)

光回路を構成するピクセルの配置は、光回路の平面領域の分割方法により規定することができる。換言すれば、結晶学において行うのと同様に、単位格子を考えてその対称性によりピク

セルの配置位置を規定することができる。ここで、単位格子は 1 つ以上のピクセルからなるものと仮定する。このような取扱いをすると、回路全体としては結晶と同様の周期性を有することとなる。このような周期性を有する回路に空間的に横方向に 5 大きく広がった理想的な平面波を入射すると、特定の波数成分に対して強い散乱が生じる。ただし、ピクセルの配置位置には、低屈折率あるいは高屈折率の媒体が適宜配置されるので、完全な周期性があるというわけではない（これらについては、たとえば、Charls Kittel ed. "Introduction to solid state p 10 hysics 6th" John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A. (19 86) を参照）。

この場合、ピクセルのサイズおよび配置ならびに光の入射方向（あるいは出射方向）に対して回路の結晶学的な配向をどのように設定するかで光回路特性が異なるため、所望の特性を得るためには、光の入射方向と波数とが重要となる。そして、上述の特定の波数成分に対する強い散乱を利用すれば、回路の小型化や特性改善が可能となる。

もっとも単純な単位格子は単一ピクセルからなるもので、このピクセルの形状を丸形や n 角形（n は 3 以上の整数）とする 20 こともできる。

図 5 3 は、このピクセル形状を蜂の巣状とした場合のピクセル配列の様子を説明するための図で、このピクセル配列とすると比較的等方的な回折面が得られる。したがって、図中の矢印のように複数の方向から光を入出力させる光回路において、さまざまな方向に大きな反射を発生させやすくなり回路特性が改善される。

また、図 5 3 で示したのと同様に、例え同じピクセル配列構

造であってもそのピクセルの配向状態を変えることにより特性改善が可能である。

なお、図54に示したように、いわゆる「準周期構造」と呼ばれる不完全周期構造も知られている。この場合の回折スペクトルはフラクタル形状となり、かつ、比較的広い範囲にスペクトルが分布することとなるため、回路を構成するうえで好都合な散乱が得られるという利点がある。
5

(実施例25)

従来、複数の入出力ポートを備える光回路において、各ポートから他のポートに一斉に信号を配信し且つ同一のポートから信号を受信するように構成されている回路には、光のパワーを単純に合分波するだけの光合分波器が用いられてきた。このため、信号を受信する際に、1つのポートだけから信号が入力される場合には、Nポートからなる回路では光が $1/N$ に減衰してしまうというなどの問題があった。このような問題が生じる原因は、光の位相を考慮した回路設計がなされていない点にある。これに対して、本発明の波動伝達媒体を用いれば、位相をも含めて合分配機能を実現できるため、余分な損失を発生させずに光を合分配することが可能となる。
10
15

図55は、相互一斉配信・一斉受信構成とした光回路の構成例を説明するための図であり、図56は、この光回路の各ポート間での信号の流れを模式化した図である。この光回路は4つのポートを有し、各ポートは他の3つのポートに向けて光を出射する一方、他の3つのポートから独立に出力される信号を受信する回路構成とされている。なお、このような光回路を基板上に作製した場合には、これらのポートに光ファイバを接続し、各ポートを終端装置または光増幅装置などに接続して使用す
20
25

る。

図 5 6 で模式化して示した各ポート間での信号の流れを、論理的な信号の流れを崩さずに変形すると図 5 7 のようになる。この図において、上下の互いに対向するポートは実際には同一ポートであるが、信号の流れを明確化するために、下側を送信ポート (+)、上側を受信ポート (-) として、機能ごとに区別して示している。ただし、これらは同一の回路により構成されるから、あくまでも、論理上の構成を示しているに過ぎない。

このとき、通常のパワーフィルタ回路では、送信側の 3 分岐によりパワーが $1/3$ となり、受信側の合波器によりパワーが $1/3$ となるため、結局 $1/9$ にまでパワーが低減する。すなわち、 $8/9$ もの損失が発生するのである。このうち、受信側の損失は他の 2 ポートから位相整合した光が入力されないために発生する損失である。そこで、他の 2 ポートからの光とは独立に受信できるように分岐方法を工夫すれば損失がなくなると考えられる。これは以下に示すように、各光の位相をも考慮して各ポートへの分配を行うことにより実現できる。

まず、各ポートの位相を、4つの数の組（すなわちベクトル）として表す。ここで、振幅は 1 としている。ただし、特定のポートへの光の分配がない場合は、その成分を 0 とする。例えば位相が、ポート 1 が 0、ポート 2 が π 、ポート 3 が π 、ポート 4 には光がないとすると、

$$\frac{1}{\sqrt{3}}(1, -1, -1, 0)$$

というベクトルを考えることとする。このような表現方法で考えると、フィールドの重なり積分はちょうどベクトルの内積として計算できるから、これを用いて所望のベクトルの組を見出せばよい。

いま、1つのポートからそのポート以外の全てのポートに均等に信号を分配するものと仮定すると、分配する側のポートに対応する成分は0となり、他のポートについては絶対値が

$$1/\sqrt{3}$$

5 となるフィールドを考えればよい。そして、それらの位相を調整することにより全てのベクトルが互いに直交すれば、他のフィールドからの信号とは独立に各ポートが光を受けることが可能となり、損失が分岐損失のみで光信号を受けることができる。

10 実際、この場合は

$\frac{1}{\sqrt{3}}(0, 1, 1, 1), \frac{1}{\sqrt{3}}(1, 0, 1, -1), \frac{1}{\sqrt{3}}(1, -1, 0, 1), \frac{1}{\sqrt{3}}(1, 1, -1, 0),$
がそのような組み合わせの一つである。これにより、従来の受信側での原理損失をなくすことができ、3倍の強度で光信号を受信することができた。

15 さらに、図58に示す不均等分配回路のように、不均等に光を分配（分岐）することによって、送信距離に伴う損失を補うことができるとともに、適当な位相を選ぶことにより損失を少なくすることが可能となり、光アンプなどを用いない低成本な光通信システムが実現できる。なお、図58では、基地局から一斉送受信をするとともに、各端末間の通信も行っている。

20 (実施例26)

本実施例は、実施例25と同様の構成の光回路であるが、直交状態が存在しない場合において出力信号の重なりを最小にするための光回路の構成例である。ここでは、3ポートの光回路の場合を考える。この場合、ポートは3つしかないので、直交状態を実現することはできない。しかし、下記に示すように、できるだけ直交状態に近い状態を選ぶことで損失の少ない構成

を実現することができる。

実施例 25 と同様に、ポートの出力を

$$\frac{1}{3}(-1, 2, 2), \frac{1}{3}(2-1, 2), \frac{1}{3}(2, 2, -1),$$

とする。ここで、自分自身にも出力があるが、これは反射戻り

5 光として取り扱うことができる。

これにより、必要なポートでは $4/9=3.5\text{dB}$ の光を得ることができる。これは従来の 3 dB カプラを 2 つ組み合わせる場合に比べて 2.5dB 低い損失である。

図 5 9 は、このような不均等分配回路の応用概念図である。

10 この図に示すように、3 ポート光回路を縦列配置することによりタップ回路が実現できる。ここでは、光回路を構成する無機ガラス材料に Er 元素をドープして $1.5\mu\text{m}$ 波長帯での増幅機能をもたせてある。回路の損失は従来よりも十分低いから、僅かな消費電力かつ短距離で増幅可能であるため、小型で低消費電力のタップ回路が構成可能である。図中にはそれを損失補償型回路として示した。

(実施例 27)

導波路回折格子においては、図 60 A および図 60 B に示すように、入射側スラブにおける入射導波路位置を固定した場合 20 、波長の変化に応じて出力位置が方向 A にずれる（図 60 A）。また、同じ波長の信号光に対して、入射導波路の位置 B をずらすと、出力位置が方向 C にずれる（図 60 B）。このような性質を利用して、波長に応じて入射導波路側のフィールドの中心位置を方向 B にずらすと、方向 A への動きと方向 C への動き 25 が打ち消しあって、フィールドが動かなくなる。

入射導波路側のフィールドの中心位置を入射導波路側のフィールドの中心位置が動かない場合の出力ポート間の波長間隔で

周期的变化させると、図 6.1 に示すように、プラトーが形成される。このプラトー部分に出射ポートの光導波路が配置されれば、矩形上の波長フィルタ特性が得られる。

これを実現するために、入射導波路部分に方向性結合器を配置し、その前段に分岐遅延回路を配置したものが提案されている。このとき、フィールドの中心位置が振れる振れ幅はフィールド径程度必要とされるために、方向性結合器のコア幅を小さくすることはできない。このため、フィールドの形状が必要なスポット径よりも広い構造となってフィールド形状が歪むこととなる。これは、その共役像である出射側の光出力像を歪ませることになり、結果として光結合が劣化するという問題がある。

そこで、本実施例においては、本発明の波動伝達媒体を用いて、複数の入射ポートからの光を、それぞれ、整形して出力し且つこれらの波を重ねあわせることにより、良好な入射フィールド形状を得るとともに、その入射ポート間の位相を調整することで、フィールドの中心位置を調整することとした。なお、本実施例では、入射ポートを 2 本とした。

ここで、座標を x で表して、入射ポートの像を、それぞれ $f_0(x)$ 、 $f_1(x)$ として、ポート間の位相差を ϕ と表す。このとき、その重ね合わせ像 $f(x, \phi)$ は、

$$f(x; \phi) = f_0(x) + h(x)e^{i\phi} = f_0(x) + f_1(x) + i\phi f_1(x) + \dots \quad \dots (38)$$

となる。所望のフィールド形状が、位相差 ϕ の関数 $x_c(\phi)$ を中心位置、 $\theta(\phi)$ を位相として、関数

$$F(x - x_c(\phi))e^{i\theta(\phi)} = F(x) + \left(-\frac{\partial F}{\partial x}(x) \cdot \frac{\partial x_c}{\partial \phi}(0) + iF(x) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \phi}(0) \right) \phi + \dots \quad \dots (39)$$

で与えられているとする。ここで、簡単のため $x_c(0) = 0$ 、 $\theta(0) = 0$ とした。このとき、 ϕ について1次の係数を比較すると

$$f_0(x) + f_1(x) = F(x) \quad \dots \quad (40)$$

5

$$if_1(x) = -\frac{\partial F}{\partial x}(x) \cdot \frac{\partial x_c}{\partial \phi}(0) + iF(x) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \phi}(0)$$

となる。これは関数 $g(x)$ 、 $h(x)$ が満たさなくてはならない式である。 ϕ は後に示すように、波長差に対応する量であることから、

$$10 \quad \frac{\partial x_c}{\partial \phi}(0)$$

は中心位置の動くべき速さに対応するので設計条件で決まる量である。

$f_0(x)$ 、 $f_1(x)$ の直交条件と規格化条件から、

$$15 \quad f_0(x) = (1-s)F(x) - i\sqrt{s-s^2}G(x) \quad \dots \quad (41)$$

$$f_1(x) = sF(x) + i\sqrt{s-s^2}G(x)$$

となる。ここで、 G は

$$\partial F / \partial x$$

20 を規格化した関数であり、 s は 1 を越えない量で、

$$25 \quad \frac{\partial x_c}{\partial \phi}(0) = \frac{\sqrt{s-s^2}}{|\partial F / \partial x|} \quad \dots \quad (42)$$

で決められる量である。なお、

$$|\partial F / \partial x|$$

はノルムの平方根である。

本発明で用いる波動伝達媒体は、直交するフィールドであれば、それぞれのフィールド形状を位相を含めて任意に設定できるので、このような波動伝達媒体を用いてこれらの出力フィールドを各入力ポートに対して設定することができる。いま、前5段の位相差を図62（アレイ導波路格子を除く入射部のみを図示してある）に示すように、導波路回路の遅延で与え、遅延回路の波長に対する出力の繰り返し周期と出力側導波路間の出力波長間隔を同一にすると、出力ポート間の導波路の間隔Dを用いて、

10

$$\frac{\partial x_c}{\partial \phi}(0) = \frac{D}{2\pi} \quad \dots \quad (43)$$

となる関係式が得られ、所望のフィールドFを決めさえすれば全てのパラメータが決まることになる。

15 たとえば、Fとしてガウス関数を仮定し、フィールド半径をwとすると、

$$|\partial F / \partial x| = 1/w$$

である。

図63は、フィールド形状としてガウス関数を仮定した場合20の、中心位置の移動の様子を示す例である。フィールドの動きが分かるようにアレイ導波路格子に入る前の部分のフィールド形状を近視野像で観察したものである。図62に示した遅延回路を含んだ構成であり、約10nm間隔で周期的にフィールドの中心位置が周期的変化していることが分かる。ただし、遷移領域では近似からずれて、2ピークになっているが、この部分は1つの出力ポートから隣の出力ポートへの遷移領域にあたるため結合には関係ない。遅延回路部分は導波路の長さで自由に

設定可能であり、かつ2分岐回路の分岐比率も自由に設定できることから、アレイ導波路格子にあわせて上記の方法で調整すれば、平坦な波長分波特性が得られる。

以上の実施形態においては、入力側導波路を2本の入力導波路としたが、より精度を向上するためには、入力側導波路の本数を増やせばよい。そのための一般論を以下に示す。

η をパラメータとする所望の関数 $F(x; \eta)$ について、1次までの近似は上記と同様の方法で得られ、2次まで展開すると、

10

$$F(x; \eta) = F(x; 0) + \eta \underbrace{\left(\frac{\partial F}{\partial \eta}(x; 0) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F}{\partial \eta^2}(x; 0) \eta \right)}_{\text{1次までの近似と同じ形}} + \dots \quad (44)$$

となる。したがって、

15

$$f(x; \phi(\eta)) = f_0(x) + f_1(x) e^{i\phi(\eta)} \quad \dots \quad (45)$$

を変形して、

20

$$\begin{aligned} f(x; \eta) &= f_0(x) + f_1(x; \eta) \exp[i\phi_1(\eta)] \\ f_1(x; \eta) &= f_1(x) + f_2(x) \exp[i\phi_2(\eta)] \end{aligned} \quad \dots \quad (46)$$

とおけば、

$$f_1(x; \eta)$$

を上記実施形態と同様にして適当な形で決めることができる。

25

ここで、上記の実施形態の場合には簡単のため ϕ をパラメータとしたが、ここでは明確な形とするため、所望のフィールドのパラメータ η で条件式を記述している。また、

$f_2(x)$

は

$f_0(x), f_1(x)$

に直交したフィールドになるようにする。また、3つ目の導波
5 路に付加すべき位相項は

$$\exp[i(\varphi_1(\eta) + \varphi_2(\eta))]$$

となる。

以上のように、所望の関数をテイラー展開して、前の次数の
10 項にまとめて、見かけ上、1つ次数の低い項の係数にパラメー
タ依存性をもたせ、その項について、1次の近似を施すこと
で、順次近似を上げることが可能である。また、パラメータが複
数ある場合も同様に一つのパラメータにあうように設定して、
その後で、上記の方法で、もう1つのパラメータについて設
定する手順で順次近似させればよい。

15 (実施例 28)

一般に石英系光導波路と半導体光導波路においては、フィー
ルド径が異なることから、光ファイバと光半導体レーザなどではレンズを介して光結合損失を低減する。しかしながら、レン
ズを用いるためには、光導波路構造とレンズの間を十分にとる
20 必要があるため、小型集積化には適さない。そこで、光導波路
と光半導体素子とをレンズを介さずに光結合する方法が試みら
れているが、図 64A にあるように、光導波路は回路内部にお
いて概ね平面波的な等位相面を有しているため、開口部からの
放射では光が回折して光結合に損失が生じることになる。さら
25 に、一般にはフィールド径の違いがあると光結合損失を生じる
ため、たとえば石英系光導波路と半導体光導波路の光結合系に
おいては石英系光導波路のフィールド径を小さくする必要があ

る。

本実施例は、本発明の波動伝達媒体を用いて上記の波面の制御とフィールド形状の制御を同時に行うことで光結合を改善するものである。本発明の波動伝達媒体は光の多重散乱を用いるため、光導波路と異なり、通常放射光となる高い横方向の波数をもつ光を制御できるために、フィールド径を導波路構造により絞り込める値よりも小さくすることが可能である。さらに、本発明の波動伝達媒体はフィールドの位相分布を制御できることから、図 6 4 B に示すように、等位相面を凹状すればよい。

図 6 5 は、比屈折率差 1.5% の石英系の平面光波回路技術で作製した波動伝達媒体によりスポット径を基板水平方向のみ整形したもののが近視野像の基板面に垂直な方向の断面である。波動伝達媒体は出射端から約 $5 \mu m$ 先にビームウエストを形成するように設計したもので、近視野像においても出射端から約 $5 \mu m$ に最小のフィールド径が実現された。参照は光導波路によるフィールドで波動伝達媒体の縦方向のフィールドの広がりと一致しているのが分かる。それに対して基板水平方向のフィールドは約 $3 \mu m$ のフィールド直径であり、光導波路構造よりも小さなフィールド径が実現できた。これにより、従来、半導体レーザーとの結合損失が約 8 dB であったものが、4 dB まで改善することができた。

(実施例 29)

以下に説明するアレイ導波路型光合分波回路は、その入力導波路と第 1 のスラブ導波路との接続領域に空間的屈折率分布に基づく散乱点を配置することにより、上述の原理に基づいて、伝搬光の位相と強度とを同時に制御するようにしているが、これにより得られる主な利点は以下のとおりである。

図 6 6 は、図 2 A に示した従来構成の回路に設けられている

パラボラ導波路 106 内のダブルピークの光フィールド分布を説明するための図である。図 2 A に示した従来構成の回路に設けられているパラボラ導波路 106 内のダブルピークのフィールド分布は、0 次モードと 2 次モードの重畠によって生じ、フィールド分布 $\Phi(x)$ は次式によって表現できる。

$$\begin{aligned}\Phi(x) &= a_0\varphi_0(x)\exp(-j\beta_0z) + a_2\varphi_2(x)\exp(-j\beta_2z) \quad \dots \quad (47) \\ &= \exp(-\beta_0z)\{a_0\varphi_0(x) + a_2\varphi_2(x)\exp(-j\delta\beta z)\}\end{aligned}$$

ここで、

$$\delta\beta = \beta_2 - \beta_0$$

であり、

$$10 \quad \varphi_m(x)$$

は m 次モードのフィールド分布、 β_m は m 次モードの伝搬定数、 a_m は m 次モードの展開係数である。すなわち、波長分散の要因である位相分布は、パラボラ導波路内に誘起された 0 次モードと 2 次モードの位相差に起因する。

これに対して、本発明のアレイ導波路格子型光合分波回路においては、導波モードではなく、複数の散乱点が位相と強度とを局所的に制御するため、より高い自由度で出射光の強度分布と位相分布を指定することが可能となる。したがって、入力導波路内の散乱点を最適に配置（すなわち、空間的屈折率分布を最適化）することにより、出射フィールド分布の形状を位相歪のないダブルピークとすることができます、低分散のアレイ導波路格子型光合分波回路を実現することが可能となる。なお、本発明の導波路構造は、小型化および所望の帯域設計をも可能とする。

25 以下に、実施例により本発明の低分散アレイ導波路格子型光合分波回路についての具体的な説明を行う。なお、以下の実施形態においては、基板にはシリコン基板を用い、その上に石英に添加物を加えて屈折率を調整した膜を堆積し、半導体作製工

程で用いられる微細加工技術により、光回路をパターン化するものである。したがって、光回路パターンは2次元的であり、基板に対して水平方向に光回路としての機能を発現するようにパターン形成される。

5 図67A～Eは、本発明の低分散アレイ導波路格子型光合分波回路の製造プロセスを説明するための図である。先ず、シリコン基板601上に、火炎堆積法により、 SiO_2 を主体にした下部クラッドガラスストート602、および、 SiO_2 に GeO_2 を添加したコアガラスストート603を堆積する(図67A)。
10 その後、1000℃以上の高温で熱処理を行い、下部クラッドガラスストート602およびコアガラスストート603のガラス透明化を実行する。このガラス透明化熱処理により、下部クラッドガラスストート602は概ね $30\text{ }\mu\text{m}$ の厚みの下部クラッドガラス層604となり、コアガラスストート603は概ね $7\text{ }\mu\text{m}$ の厚みのコアガラス605となる(図67B)。
15

なお、図67Aにおいて堆積される下部クラッドガラスストート602およびコアガラスストート603の厚みは、図67Bに示したガラス透明化熱処理により両層の厚みが上記厚みとなるように決定されている。

20 このガラス透明化熱処理に続き、コアガラス605の上にエッティングマスク606をフォトリソグラフィ技術を用いて形成し(図67C)、さらに、反応性イオンエッティングによりコアガラス605にパターニングを施す(図67D)。

25 パターニングされたコアガラス605上に残存しているエッティングマスク606を除去した後に上部クラッドガラス607を火炎堆積法により形成し、コアガラス605を、上部クラッドガラス607と下部クラッドガラス604との間に埋め込む(図67E)。なお、上部クラッドガラス607のガラス転移温度を低くするために、この上部クラッドガラス607には、ボ

ロン（B）やリン（P）などのドーパントが添加されている。ガラス転移温度を低くすることにより、パターニングされたコアガラス605相互間に狭い隙間にも上部クラッドガラス607が満遍なく入り込み易くなる。

5 このようにして得られたパターニングされたコアガラス605は、コアガラス605相互間に介在する上部クラッドガラス607よりも高い屈折率を有する。したがって、コアガラス605の存在領域に相当する高屈折率部と、コアガラス605相互間に介在する上部クラッドガラス607の存在領域に相当する低屈折率部とにより、2次元的な空間的屈折率分布が形成され、高屈折率部であるコアガラス605の各々は、導波光に対する散乱点として作用し、この散乱点の配置を最適化（すなわち、空間的屈折率分布を最適化）することで光フィールドの位相と強度の局所的制御が可能となる。

15 図68は、バスバンド拡大アレイ導波路格子型光合分波回路のスラブ導波路に接続される入力導波路を、上述の原理に基づいて設計した構造（散乱点配置）の例を説明するための図で、図中黒部で示した領域が散乱点（高屈折率部）に対応している。この図に示すように、散乱点の入力導波路内での2次元的な配置分布は、光の伝搬方向に伸びる直線に対して概ね線対称である。

この構造は、導波路内の散乱点を上述した最急降下法により最適配置することによって設計されたもので、この導波路は長さ $300\mu m$ 、幅 $160\mu m$ の領域を有している。この領域を25 1500×800 のピクセルに分割（ピクセルの1辺の長さは $0.2\mu m$ となる）し、これらの微小領域に散乱点（低屈折率部との屈折率差 $\Delta = 0.75\%$ ）を最適配置して空間的屈折率分布を形成している。なお、伝搬光を効果的に散乱させるためには、散乱点の1辺の長さを $0.2\mu m$ 以上とすることが好ま

しい。

図 6 9 は、図 6 8 に示した散乱点配置を有する入力導波路から出射される光フィールドの分布（振幅および位相）の計算結果を説明するための図で、この図に示すように、等位相面に歪がなく、かつ、その振幅はダブルピーク（双峰）を有する出射光フィールド分布が得られている。
5

図 7 0 は、本実施例の入力導波路を用いてチャネル間隔 10 0 G H z のアレイ導波路格子型光合分波回路を構成し、この回路のパスバンド拡大化効果と低波長分散化効果を検証した結果
10 を説明するための図である。

図 4 に示した従来構成の回路特性との比較から明らかなように、本発明の回路の波長分散は相対波長依存性をもたず透過帯域幅に殆ど影響を与えることなく低分散化が顕著であり、かつ、光損失特性も向上していることがわかる。

15 これまでの説明では、散乱点として高屈折率の散乱体を用いたが、入力側スラブ導波路の端部に、高屈折率ではなく低屈折率の散乱体を配置しても同様の効果を得ることができる。また、シリコン基板上に設けられた石英系ガラス導波路によりアレイ導波路格子型光合分波回路を構成した例について示したが、導
20 波路の構成材料はガラスに限定されるものではなく、ポリイミド、シリコーン、半導体、 $L i N b O_3$ などの他の材料であってもよい。また、用いる基板もシリコンに限定されるものではないことはいうまでもない。

請求の範囲

1. 所望の光入出力のある断面が与えられるべき回路上の場所をポートとよぶときに、入力側ポート（入力ポート）からの入射光を所望の出力側ポート（出力ポート）に出力する波動伝達媒体であって、

前記波動伝達媒体は、前記入力ポートからの入射光が当該波動伝達媒体中で多重散乱しながら伝搬するように決定された空間的な屈折率分布を有し、

10 当該波動伝達媒体内の局所的な位置は、仮想的なメッシュにより画定される仮想的なピクセルにより指定され、

前記ピクセルの各々が有する屈折率により前記波動伝達媒体の空間的な屈折率分布を成すことを特徴とする波動伝達媒体。

15 2. 前記波動伝達媒体の屈折率分布は、前記入力ポートからの入射光の順伝搬光のフィールドの位相と前記出射光を位相共役に逆伝搬させた逆伝搬光のフィールドの位相との差を、前記波動伝達媒体の各点において整合させるように設定されていることを特徴とする請求の範囲第1項に記載の波動伝達媒体。

20 3. 前記ピクセルの取り得る屈折率は、低屈折率 (n_L) または高屈折率 (n_H) の何れかであり、

前記屈折率分布は、低屈折率 (n_L) を有するピクセルと高屈折率 (n_H) を有するピクセルを空間的に配置することにより与えられるものであること、を特徴とする請求の範囲第1項または第2項に記載の波動伝達媒体。

4. 前記低屈折率 (n_L) を有するピクセルの、前記波動伝

達媒体中における前記入射光の伝搬方向での存在確率は、30%以下であることを特徴とする請求の範囲第3項に記載の波動伝達媒体。

5. 前記ピクセルは、下限屈折率と上限屈折率との間の有限個の屈折率を取り得、前記屈折率分布は当該有限個の屈折率のうちの何れかの屈折率を有する前記ピクセルを空間的に配置させることにより与えられるものであること、を特徴とする請求の範囲第1項または第2項に記載の波動伝達媒体。

6. 前記入力ポートから入射される光を、所望の割合で互いに異なる出力ポート位置に分波されるように前記屈折率分布が決定されていることを特徴とする請求の範囲第1項乃至第5項の何れかに記載の波動伝達媒体。

7. 前記入力ポートから入射される光は複数の波長の光の波長多重光であり、当該波長多重光をなす各々の波長の光に対応付けられた互いに異なる出力ポート位置に分波されるように前記屈折率分布が決定されていることを特徴とする請求の範囲第1項乃至第6項の何れかに記載の波動伝達媒体。

8. 前記入力ポートから入射される光は複数の波長の光の波長多重光であり、当該波長多重光をなす各々の波長の光が所望の割合で互いに異なる出力ポート位置に分波されるように前記屈折率分布が決定されていることを特徴とする請求の範囲第1項乃至第6項の何れかに記載の波動伝達媒体。

9. 前記入力ポートから入射される光はTEモードとTMモードの偏波多重光であり、当該偏波多重光をなす各々の偏波に対応付けられた互いに異なる出力ポート位置に分波されるように前記屈折率分布が決定されていることを特徴とする請求の範囲第1項乃至第6項の何れかに記載の波動伝達媒体。

1 0 . 前記入力ポートから入射される光は T E モードと T M モードの偏波多重光であり、当該偏波多重光をなす各々の偏波が所望の割合で互いに異なる出力ポート位置に分波されるように前記屈折率分布が決定されていることを特徴とする請求の範囲第 1 項乃至第 6 項の何れかに記載の波動伝達媒体。
5

1 1 . 前記波動伝達媒体を構成する物質は誘電体であることを特徴とする請求の範囲第 1 項乃至第 1 0 項の何れかに記載の波動伝達媒体。

1 2 . 請求の範囲第 1 項乃至第 1 1 項の何れかに記載の波動
10 伝達媒体の製造方法であって、

初期屈折率分布を仮定した前記波動伝達媒体中において、前記入射光のフィールド分布 1 と、前記出射光を前記出力ポートから仮想的に逆伝搬させた光のフィールド分布 2 と、を求める第 1 のステップと、

15 前記波動伝達媒体の各点において、前記フィールド分布 1 と前記フィールド分布 2 との位相差が少なくなるように、前記屈折率分布を決定する第 2 のステップと、

前記出力ポート位置において、前記フィールド分布 1 と前記出射光のフィールド分布とが所望の誤差以下となるまで、
20 前記第 1 のステップと前記第 2 のステップとを繰り返して前記屈折率分布を逐次近似する第 3 のステップと、を備えてい
ることを特徴とする波動伝達媒体の製造方法。

25 1 3 . 前記第 2 のステップにおける屈折率分布の決定は、前記ピクセルの各々の屈折率を変数とする最急降下法により実行されることを特徴とする請求の範囲第 1 2 項に記載の波動伝達媒体の製造方法。

1 4 . 請求の範囲第 1 項乃至第 1 1 項の何れかに記載の波動

伝達媒体の製造方法であって、

前記屈折率分布を逐次近似するための第1のルーチンと第2のルーチンとを備え、

前記第1のルーチンは、

5 初期屈折率分布を仮定した前記波動伝達媒体中において、前記入射光のフィールド分布1と、前記出射光を前記出力ポートから仮想的に逆伝搬させた光のフィールド分布2と、を求める第1のステップと、

10 前記波動伝達媒体内の位置における前記フィールド分布2の位相が当該位置における前記フィールド分布1の位相と整合するように前記屈折率分布を変更する第2のステップと、

当該変更後の屈折率分布を用いて前記位置におけるフィールド分布2を求め直す第3のステップと、

15 前記位置を逆伝搬方向に所定量だけ移動させて新たな位置として定義し直す第4のステップと、

前記第1乃至4のステップを繰り返して前記屈折率分布を逐次近似する第5のステップと、を備え、

前記第2のルーチンは、

20 前記第1のルーチンで決定された屈折率分布を仮定した前記波動伝達媒体中において、前記出射光のフィールド分布1と、前記出射光を前記出力ポートから仮想的に逆伝搬させた光のフィールド分布2と、を求める第6のステップと、

25 前記波動伝達媒体内の位置における前記フィールド分布1の位相が当該位置における前記フィールド分布2の位相と整合するように前記屈折率分布を変更する第7のステップと、

当該変更後の屈折率分布を用いて前記位置におけるフィールド分布1を求め直す第8のステップと、

前記位置を順伝搬方向に所定量だけ移動させて新たな位置として定義し直す第9のステップと、

前記第6乃至9のステップを繰り返して前記屈折率分布を逐次近似する第10のステップと、を備えていることを特徴とする波動伝達媒体の製造方法。
5

1 5 . 前記第2のステップにおいて、

前記フィールド分布2としては、逐次近似前の屈折率分布中で前記出射光を入射面まで伝搬させたときのフィールド分布を当該逐次近似前の屈折率分布中で順伝搬させて得られたフィールド分布を用い、
10

前記フィールド分布1としては、逐次近似前の屈折率分布中で前記入射光を出射面まで伝搬させたときのフィールド分布を当該逐次近似前の屈折率分布中で逆伝搬させて得られたフィールド分布を用いる、ことを特徴とする請求の範囲第1
15 4項に記載の波動伝達媒体の製造方法。

1 6 . 前記出力ポート位置における前記フィールド分布1と前記出射光のフィールド分布とが所望の誤差以下となるまで、前記第1のルーチンと前記第2のルーチンを順次繰り返す第3のルーチンを備えていることを特徴とする請求の範囲第
20 14項または第15項に記載の波動伝達媒体の製造方法。

1 7 . 前記フィールド分布1および前記フィールド分布2の各々には、前記波動伝達媒体中における、前記入射光および逆伝搬光の各々の反射光成分が線込まれていることを特徴とする請求の範囲第12項乃至第16項の何れかに記載の波動
25 伝達媒体の製造方法。

1 8 . 前記初期屈折率分布としてランダム分布を仮定することを特徴とする請求の範囲第12項乃至第17項の何れかに

記載の波動伝達媒体の製造方法。

1 9 . 前記入力ポートからの入射光は複数の波長の光の波長多重光またはT EモードとT Mモードの偏波多重光であり、

5 前記屈折率分布の逐次近似は、前記多重光の各波長の光ごとまたは各編波ごとに定義されたフィールド分布2を用いて順次実行され、

前記多重光をなす各波が所望の割合で互いに異なる出力ポート位置に分波されるように前記屈折率分布が決定されていることを特徴とする請求の範囲第12項乃至第18項の何れかに記載の波動伝達媒体の製造方法。

2 0 基板上に、請求の範囲第1項乃至第11項の何れかに記載の波動伝達媒体を2次元的に配置して構成されていることを特徴とする導波回路。

2 1 . 請求の範囲第20項に記載の導波回路を用いて多モード干渉回路が構成されていることを特徴とする導波回路。

2 2 . 請求の範囲第20項に記載の導波回路を用いて光曲げ回路が構成されていることを特徴とする光回路。

2 3 . 請求の範囲第20項に記載の導波回路を用いて構成された光回路であって、前記導波回路の屈折率分布は、電気光効果に基づく当該導波路回路の局所的な屈折率変化により実現されることを特徴とする光回路。

2 4 . 請求の範囲第20項に記載の導波回路を用いて構成された光回路であって、

前記ピクセルの各々の屈折率は、前記基板に対して垂直方向に光を閉じ込めるように決定されていることを特徴とする光回路。

2 5 . 前記仮想的なメッシュは、周期的な繰り返しにより前記導波領域を形成する単位格子の構成要素であることを特徴

とする請求の範囲第24項に記載の光回路。

26. 前記単位格子は、準周期構造を形成する形状を有するものであることを特徴とする請求の範囲第24項または第25項に記載の光回路。

5 27. 前記ピクセルが取り得る屈折率値は2値化されており、高屈折率(n_H)または低屈折率(n_L)の何れかであることを特徴とする請求の範囲第24項乃至第26項の何れかに記載の光回路。

28. 前記高屈折率を有するピクセルのサイズは、前記導波領域内を伝搬する光の波長以下に設定されていることを特徴とする請求の範囲第27項に記載の光回路。

10 29. 次式で与えられる値が0.1以下であることを特徴とする請求の範囲第27項または第28項に記載の光回路。

$$\frac{\lambda q}{\pi n a}$$

15 (λ : 伝搬光波長、 n : 高屈折率を有するピクセルの屈折率値(n_H)、 a : 高屈折率を有するピクセルの高さ、 q : 伝搬光のフィールド分布の放射成分の平均距離を z としたとき $q = (z/a)$ で与えられる係数)

20 30. 前記高屈折率を有するピクセルは n 角形(n は3以上の整数)の多角形状を有し、当該の何れの辺も、前記導波領域を伝搬する光の伝搬方向と傾斜するように前記ピクセルが配置されていることを特徴とする請求の範囲第24項乃至第29項の何れかに記載の光回路。

25 31. 前記多角形状は正方形であり、前記傾斜の角度が45度であることを特徴とする請求の範囲第30項に記載の光回路。

32. 前記ピクセルの各々は、前記仮想的なメッシュにより画定される領域以上の所望のサイズを有し、前記ピクセルの

何れかは、前記仮想的なメッシュにより画定される格子位置からはずれた位置に配置されていることを特徴とする請求の範囲第24項乃至第31項の何れかに記載の光回路。

33. 前記高屈折率(n_h)を有するピクセルは、第1の高屈折率層と当該第1の高屈折率層よりも低い屈折率を有する第2の高屈折率層とを順次積層させた導波部を有する一方、前記低屈折率(n_l)を有するピクセルは、前記第2の高屈折率層からなる導波部を有し、前記前記高屈折率(n_h)を有するピクセルの導波部を伝搬する光フィールド径の中心位置と前記前記低屈折率(n_l)を有するピクセルの導波部を伝搬する光フィールド径の中心位置とが、前記基板表面と平行な同一平面上にあるように設定されていることを特徴とする請求の範囲第27項乃至第32項の何れかに記載の光回路。
10

34. 前記導波領域は誘電体材料で構成されており、当該誘電体材料は、光損失機能または光増幅機能を備えていることを特徴とする請求の範囲第24項乃至第33項の何れかに記載の光回路。
15

35. 前記誘電体材料は、光の波長に依存する複素屈折率を有することを特徴とする請求の範囲第34項に記載の光回路。
20

36. 前記導波領域は、少なくとも、第1の低屈折率層と導波部である高屈折率層と第2の低屈折率層とが順次積層された構造を有し、当該第1および第2の低屈折率層により前記高屈折率層中に光が閉じ込められることを特徴とする請求の範囲第24項乃至第35項の何れかに記載の光回路。
25

37. 前記高屈折率層の少なくとも一方の表面上には、凹部を設けることでレリーフ状のパターンニングが施されており、前記凹部を低屈折率部とし当該凹部以外の部分を高屈折率部とすることにより前記空間的屈折率分布が与えられていることを特徴とする請求の範囲第36項に記載の光回路。
30

3 8 . 前記レリーフ状のパターンニングが、前記高屈折率層の両面に施されていることを特徴とする請求の範囲第37項に記載の光回路。

5 3 9 . 前記高屈折率層の両面に施されたレリーフ状のパターンは、互いに異なるパターンであることを特徴とする請求の範囲第38項に記載の光回路。

4 0 . 前記高屈折率層の両面に施されたレリーフ状のパターンの前記凹部の深さが、何れも等しいことを特徴とする請求の範囲第38項または第39項に記載の光回路。

10 4 1 . 前記ピクセルは、高屈折率 (n_H) または低屈折率 (n_L) の何れかの2値化された屈折率を有する複数の仮想のサブピクセルに分割されており、当該2値化されたサブピクセルの配列により前記ピクセルの屈折率分布が与えられていることを特徴とする請求の範囲第24項乃至第40項の何れかに記載の光回路。

15 4 2 . 前記ピクセルにおいて、伝搬光の波面進行方向への伝搬定数の空間的变化割合として、屈折率差の变化の割合として屈折率差を1波長以上の距離をかけて変化させることを特徴とする請求の範囲第24項乃至第41項の何れかに記載の光回路。

20 4 3 . 前記ピクセルまたは前記サブピクセルの前記基板と平行な断面形状は、円形であることを特徴とする請求の範囲第42項に記載の光回路。

25 4 4 . 前記ピクセルまたは前記サブピクセルの前記基板に垂直な断面形状は、滑らかに変化する曲線を有する形状であることを特徴とする請求項42または43に記載の光回路。

4 5 . 前記第1または第2の低屈折率層の少なくとも一方は、互いに屈折率が異なる複数の層を積層させて構成されている

ことを特徴とする請求の範囲第36項乃至第44項の何れかに記載の光回路。

46. 前記光回路は3つ以上の入出力ポートを備えた相互一
斉配信・一斉受信構成の光回路であり、

5 前記空間的屈折率分布は、前記入出力ポートから出力され
る信号の位相が互いに直交するように設定されていることを
特徴とする請求の範囲第24項乃至第45項の何れかに記載
の光回路。

47. 前記光回路は3つ以上の入出力ポートを備えた相互一
10 斉配信・一斉受信構成の光回路であり、

前記空間的屈折率分布は、前記入出力ポートから出力され
る信号の位相が互いに直交しない場合に出力信号の重なりを
最小とするように設定されていることを特徴とする請求の範
囲第24項乃至第45項の何れかに記載の光回路。

15 48. 前記光回路の分岐比率が非対称であることを特徴とす
る請求の範囲第46項または第47項に記載の光回路。

49. 上記光回路には増幅機能が備えられていることを特徴
とする請求の範囲第46項乃至第48項の何れかに記載の光
回路。

20 50. 前記光回路は複数の入力ポートを有し、かつ、当該複
数の入力ポートから入力された光信号が同一の出射面から出
力されるように構成されており、

前記空間的屈折率分布は、前記複数の入力ポートから出力
される各々の信号光の互いの位相を調整して重ねあわせ、出
25 力される光フィールド形状を整形するように設定されている
ことを特徴とする請求の範囲第24項乃至第49項の何れかに
記載の光回路。

51. 請求の範囲第50項に記載の光回路をアレイ導波路格

子回路の入力側スラブに配置した光回路であって、

前記複数の入力ポートの相互間の位相差は前記光回路の光導波路の回路長で与えられており、

前記光導波路の回路長で与えられる位相差の繰り返し周期 (free spectrum range) は前記アレイ導波路格子回路の出力の波長間隔と一致しており、前記アレイ導波路格子回路の波長分散特性を前記出力の波長間隔で周期的に打ち消すように、前記光回路からの出力のフィールド中心位置が周期的に変動することを特徴とする光回路。

10 5 2. 前記空間的屈折率分布は、出力光のスポットサイズ変換を可能とするフィールド形状と位相分布を実現するように設定されていることを特徴とする請求の範囲第 2 4 項乃至第 5 1 項の何れかに記載の光回路。

15 5 3. 請求の範囲第 2 0 項に記載の導波回路を用いて構成されたアレイ導波路格子型光合分波回路であって、

平面基板上に、入力導波路と第 1 のスラブ導波路とアレイ導波路と第 2 のスラブ導波路と出力導波路とが順次接続されており、

20 前記入力導波路と前記第 1 のスラブ導波路との接続領域には、当該入力導波路の屈折率に比較して高屈折率の散乱点が複数配置されて設けられていることを特徴とするアレイ導波路格子型光合分波回路。

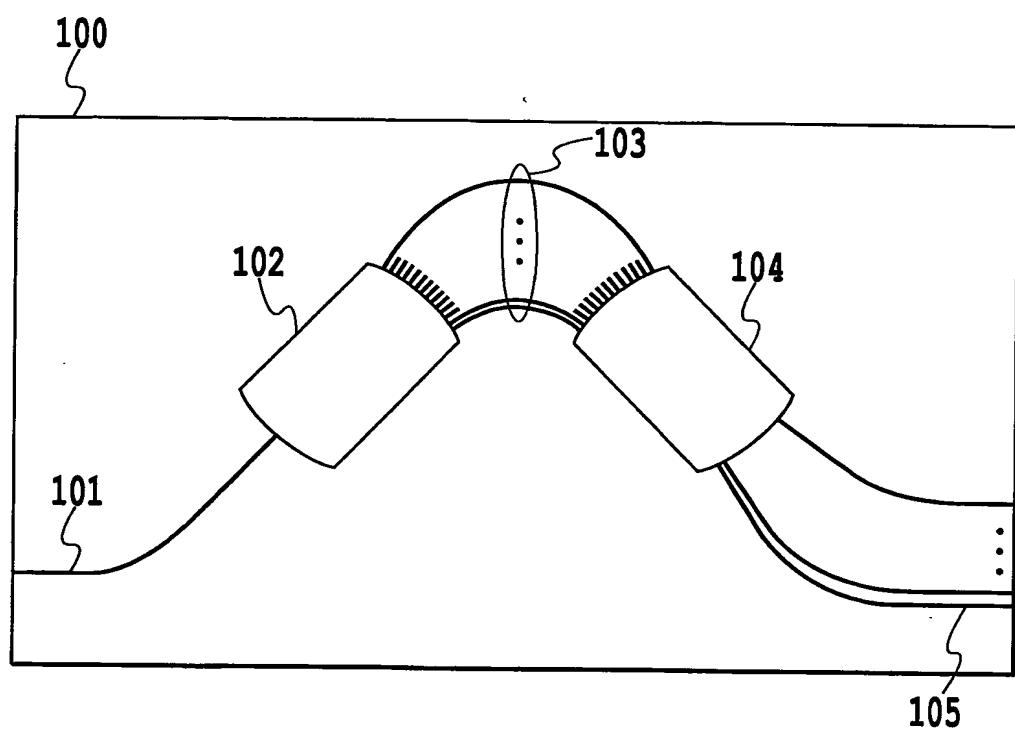
25 5 4. 前記散乱点は、前記入力導波路の出力端に形成される光フィールド分布の等位相面に歪がなく且つ振幅にダブルピークを有するように配置されていることを特徴とする請求の範囲第 5 3 項に記載のアレイ導波路格子型光合分波回路。

5 5. 前記散乱点の前記入力導波路内での 2 次元的な配置分布は、前記光の伝搬方向に伸びる直線に対して概ね線対称であることを特徴とする請求の範囲第 5 3 項に記載のアレイ導

波路格子型光合分波回路。

5 6 . 前記散乱点の 1 辺の長さは、 $0 . 2 \mu m$ 以上であるこ
とを特徴とする請求の範囲第 5 3 項乃至第 5 5 項の何れかに
記載のアレイ導波路格子型光合分波回路。

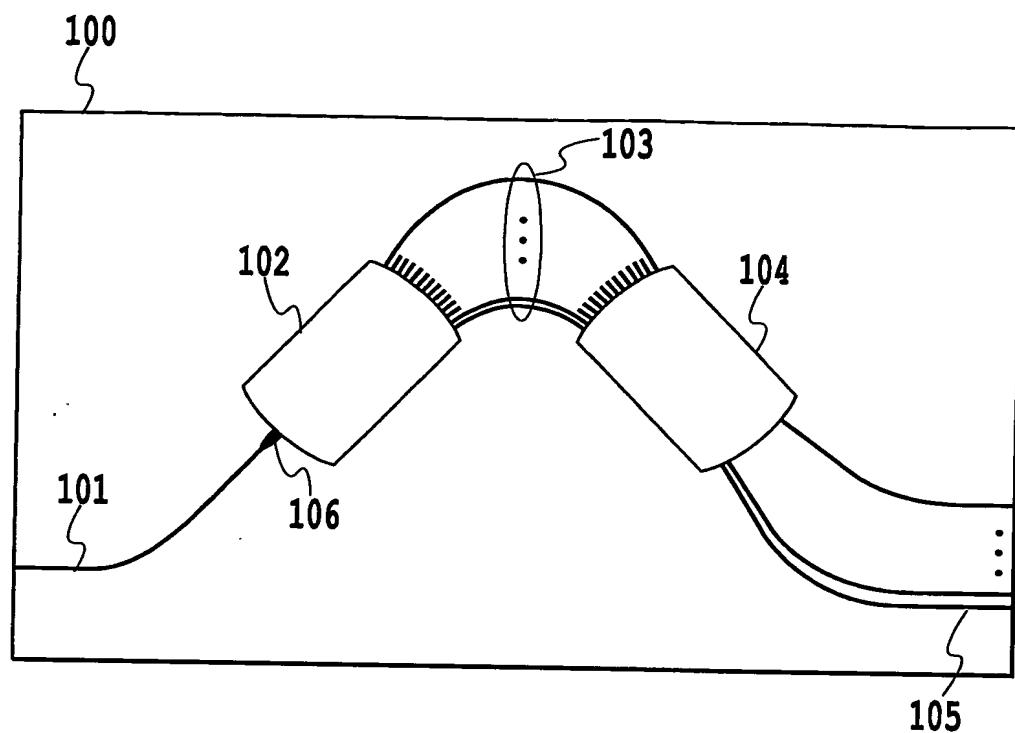
5 7 . 前記平面基板はシリコン基板であり、前記光導波路は
石英系ガラス光導波路であることを特徴とする請求の範囲第
5 3 項乃至第 5 6 項の何れかに記載のアレイ導波路格子型光
合分波回路。



従来技術

FIG.1

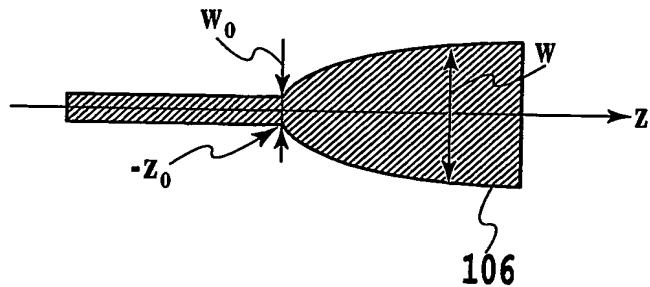
2/70



従来技術

FIG.2A

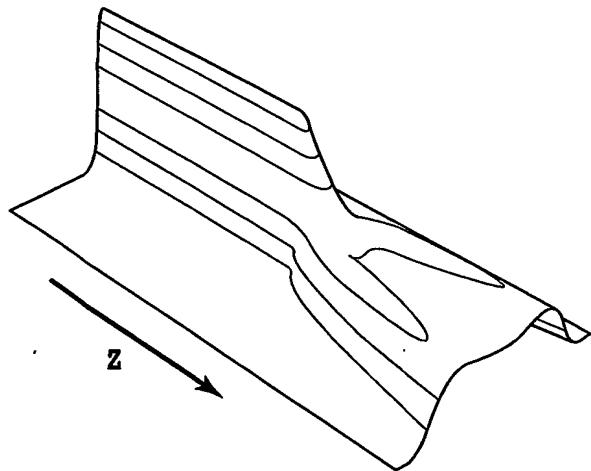
$$z = A(w^2 - w_0^2) - z_0$$



従来技術

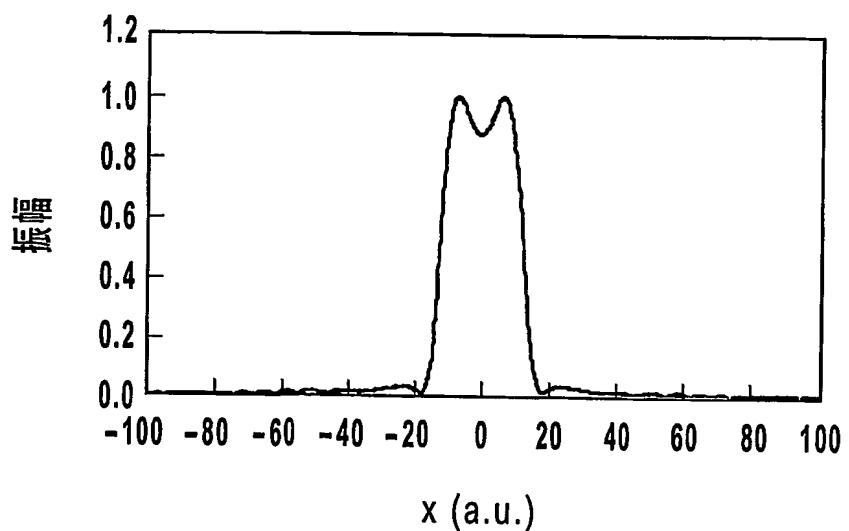
FIG.2B

3/70



従来技術

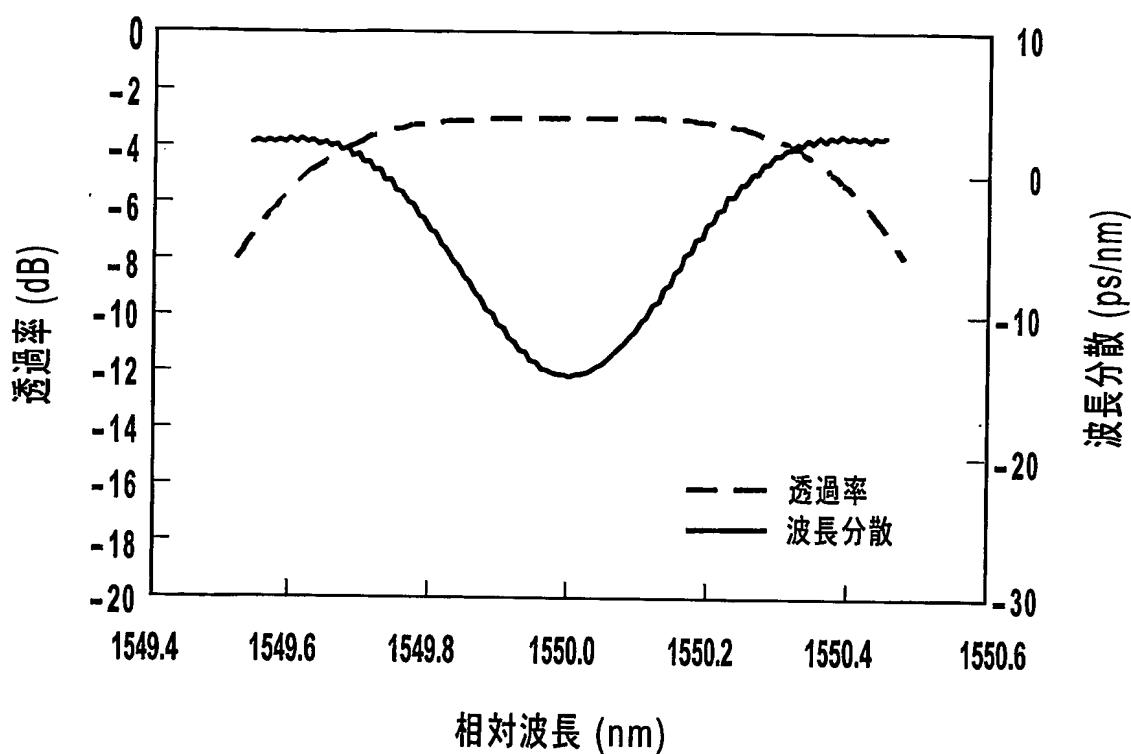
FIG.3A



従来技術

FIG.3B

4/70



従来技術

FIG.4

5/70

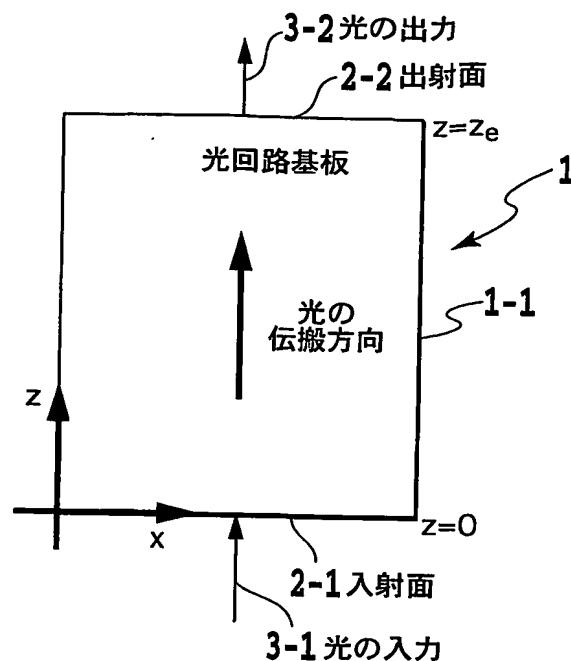


FIG.5A

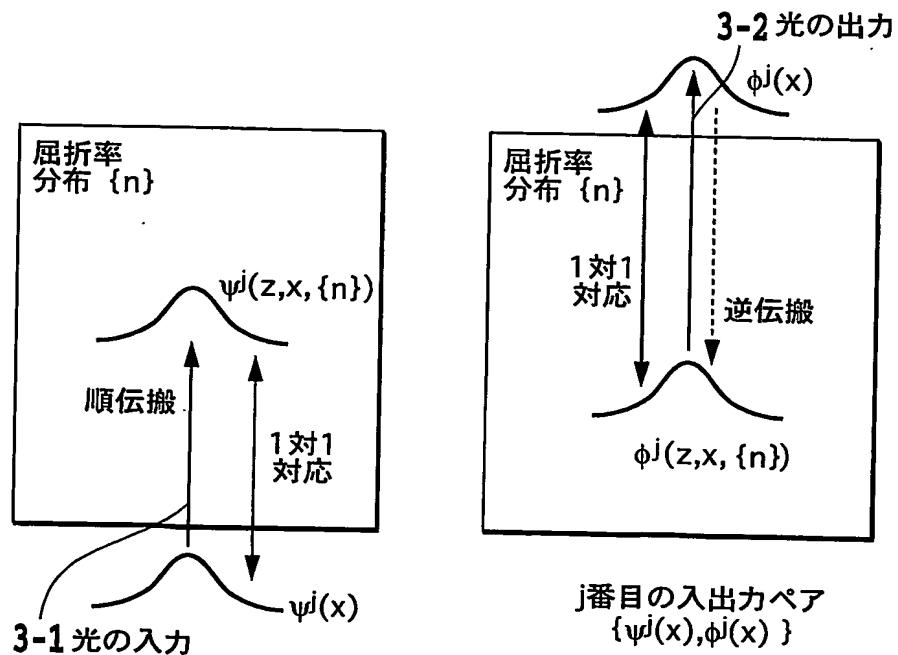


FIG.5B

FIG.5C

6/70

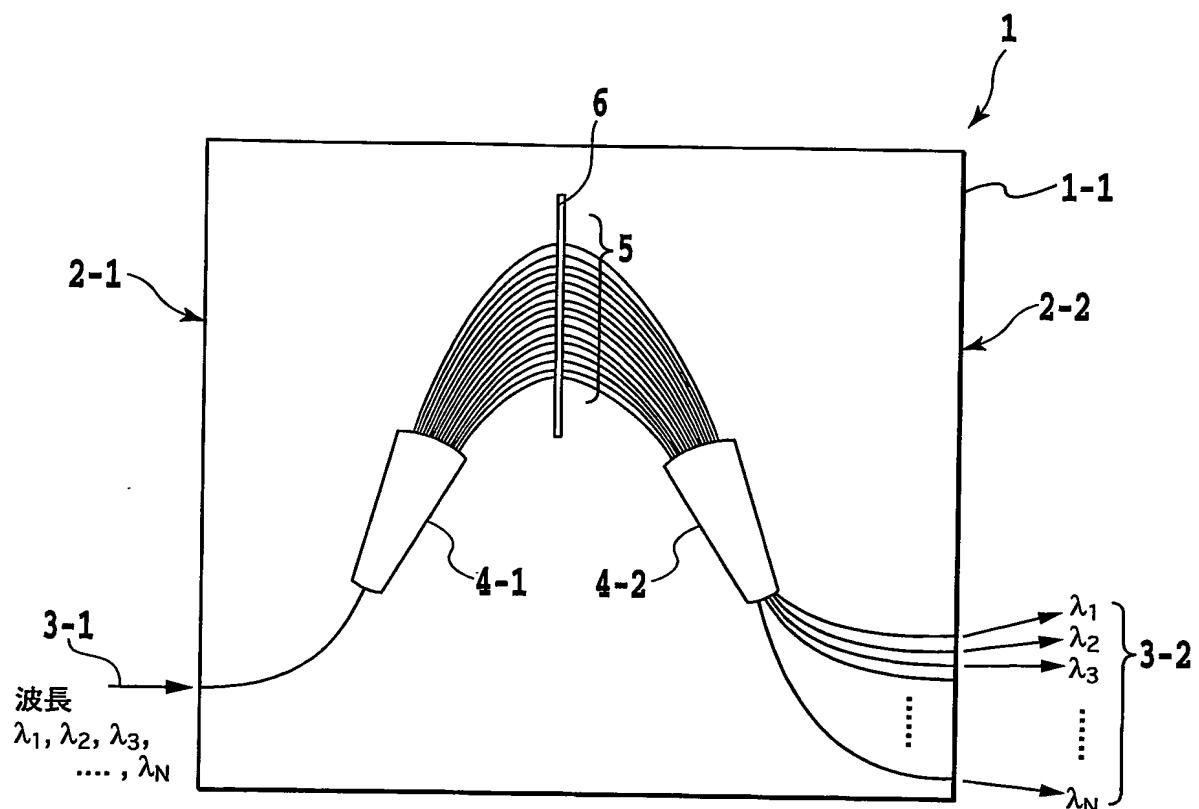
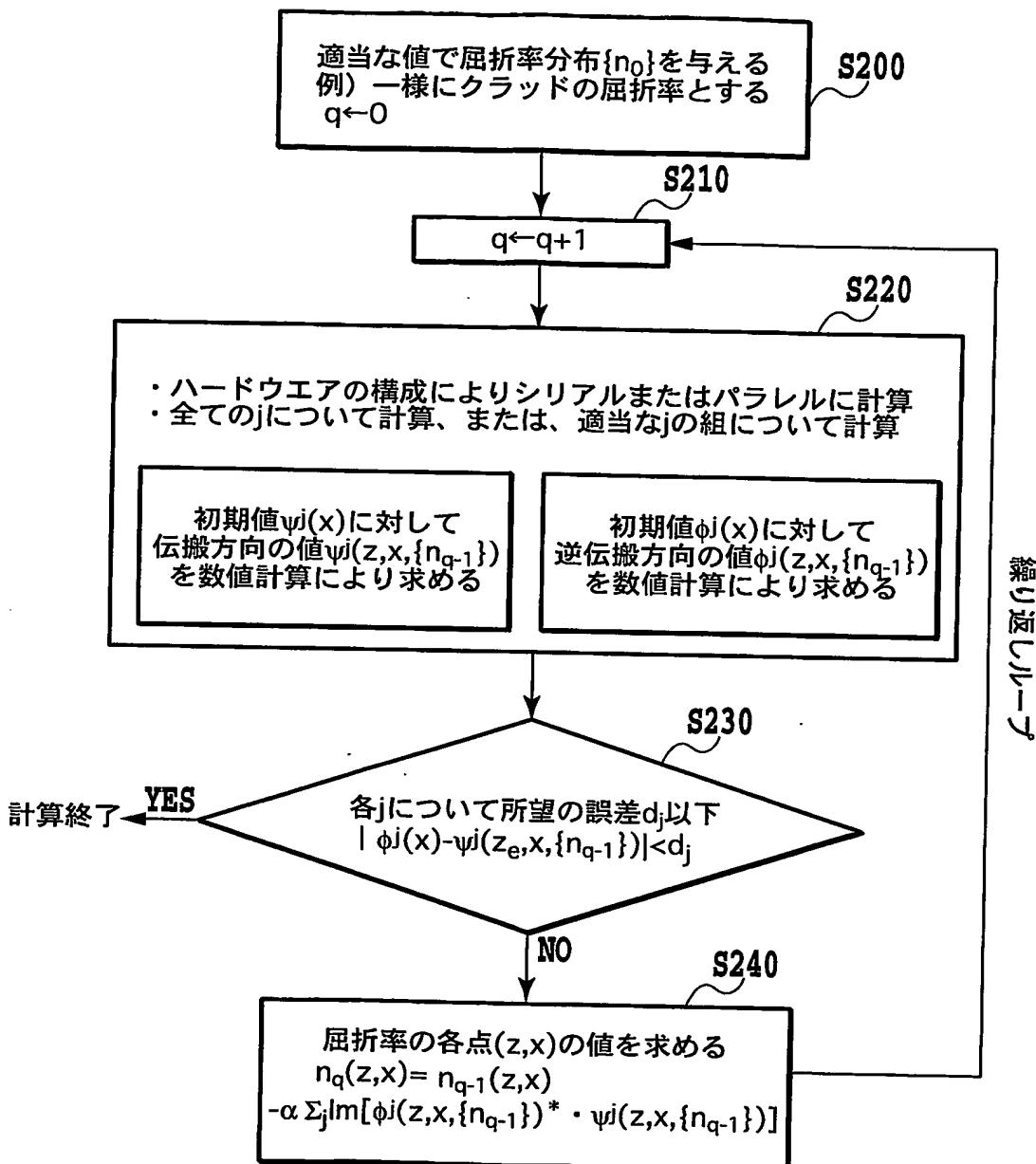


FIG.6

7/70



※ “←” の意味はたとえば
 $A \leftarrow B + C$
 は A に B と C の和を代入することを表す

FIG.7

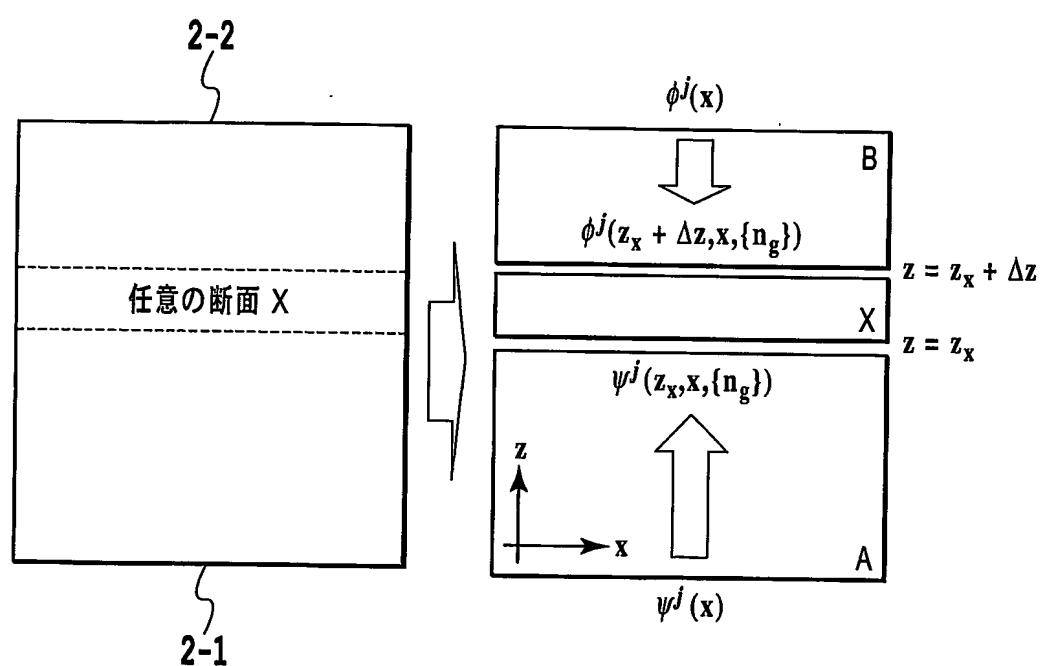
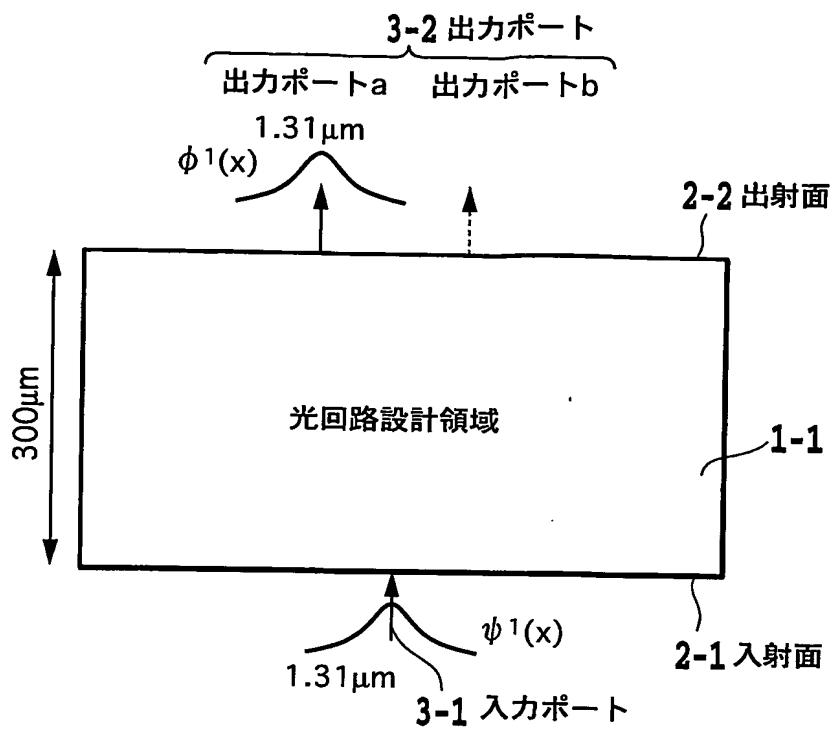
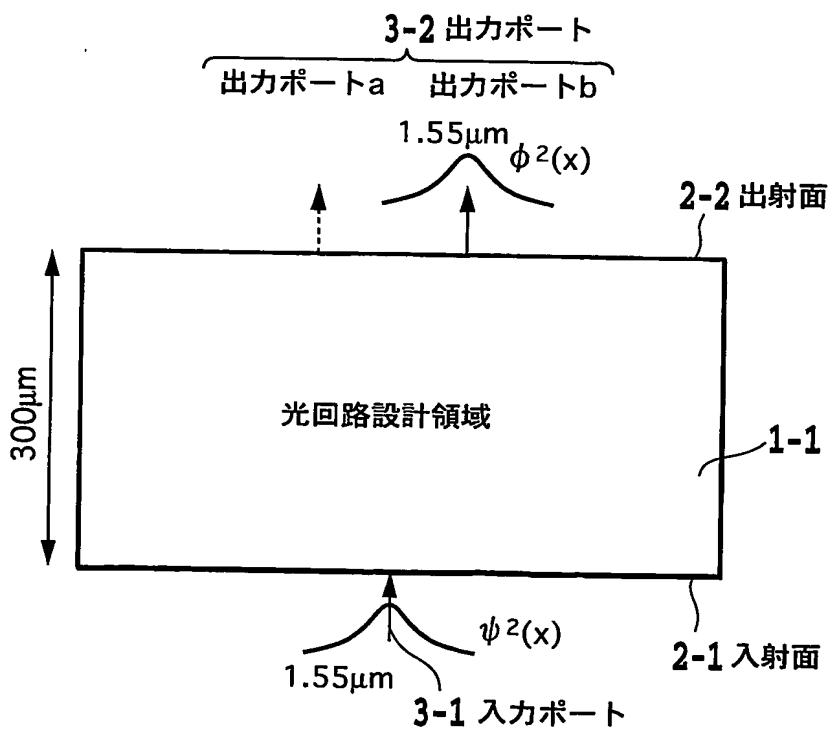
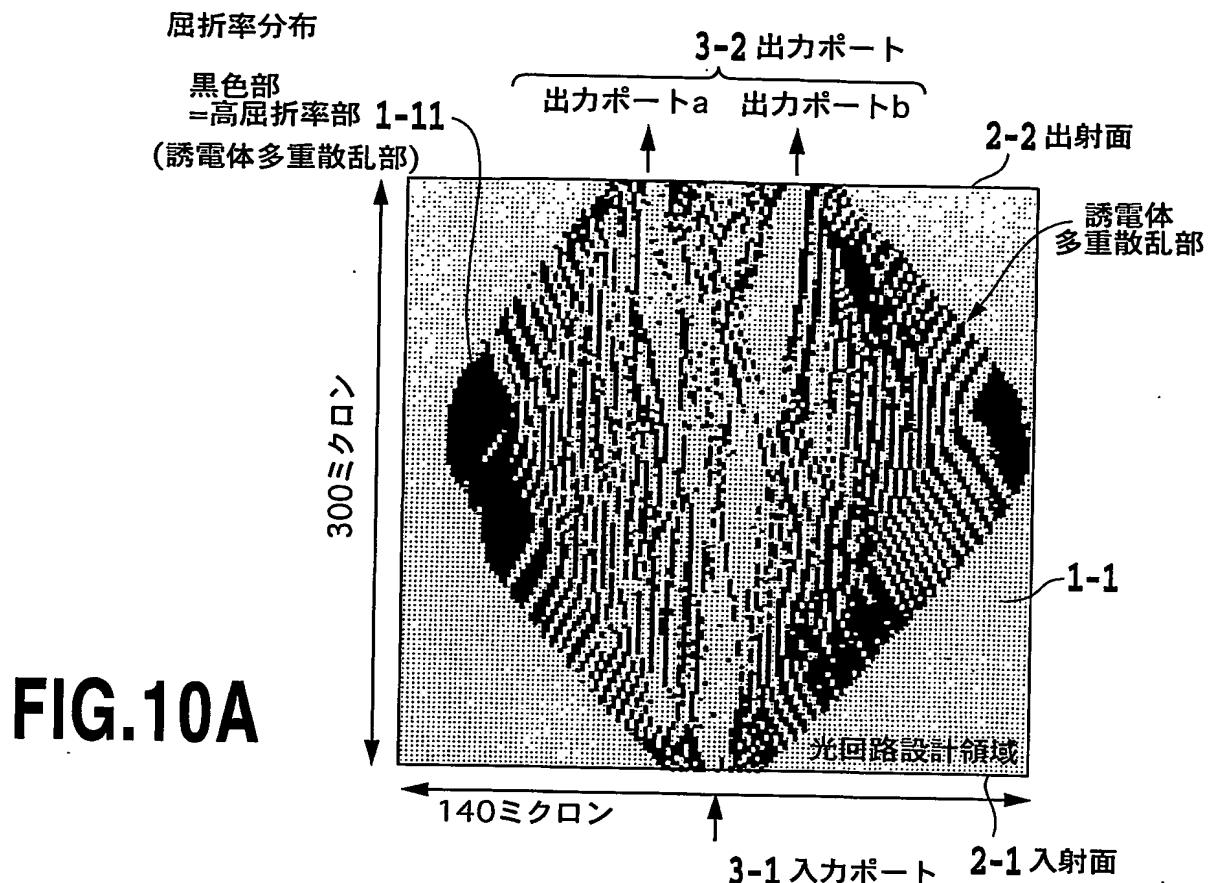


FIG.8

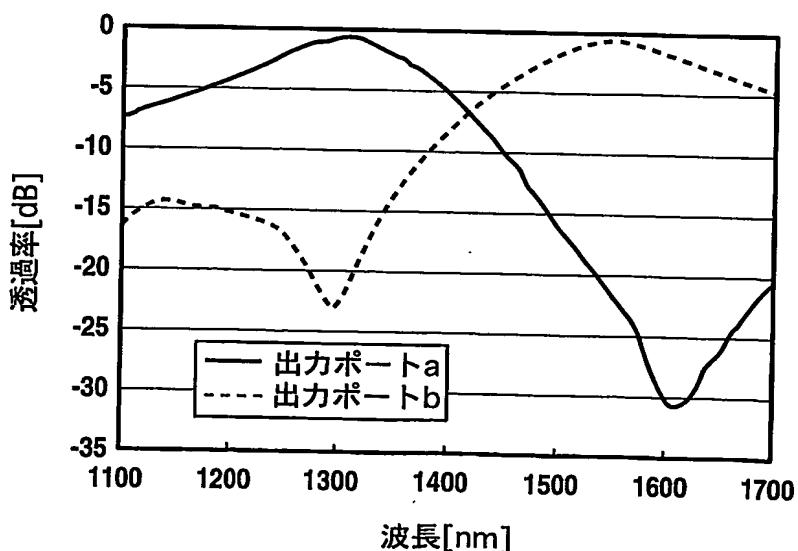
9/70

FIG.9A**FIG.9B**

10/70



透過スペクトル

FIG.10B

11/70

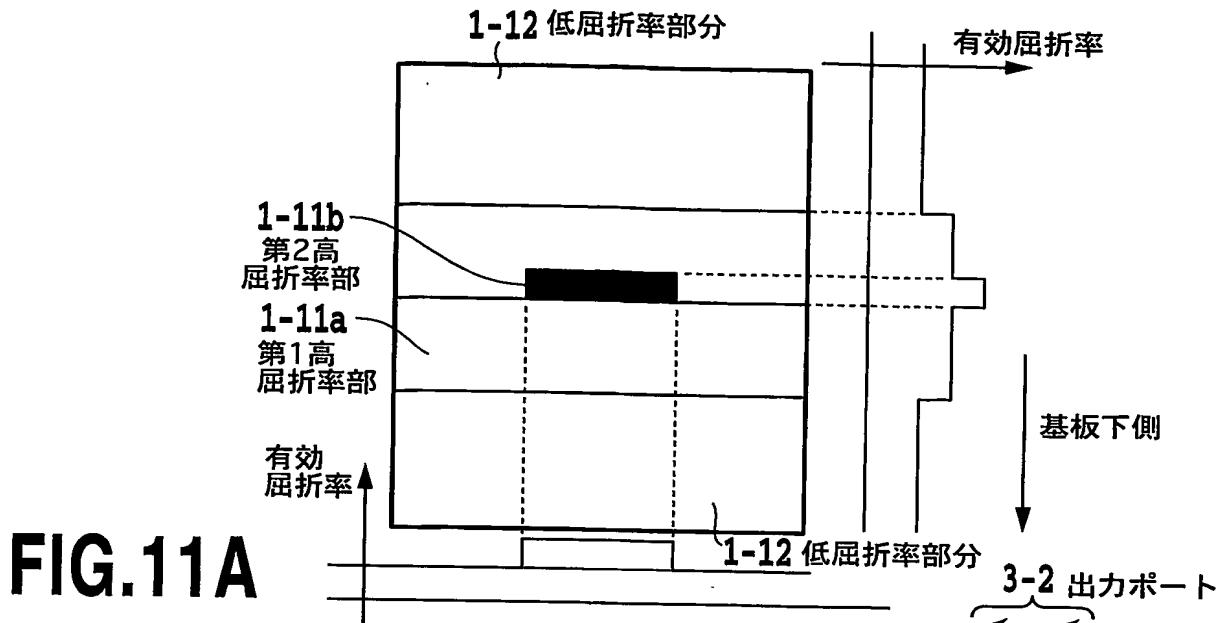


FIG. 11A

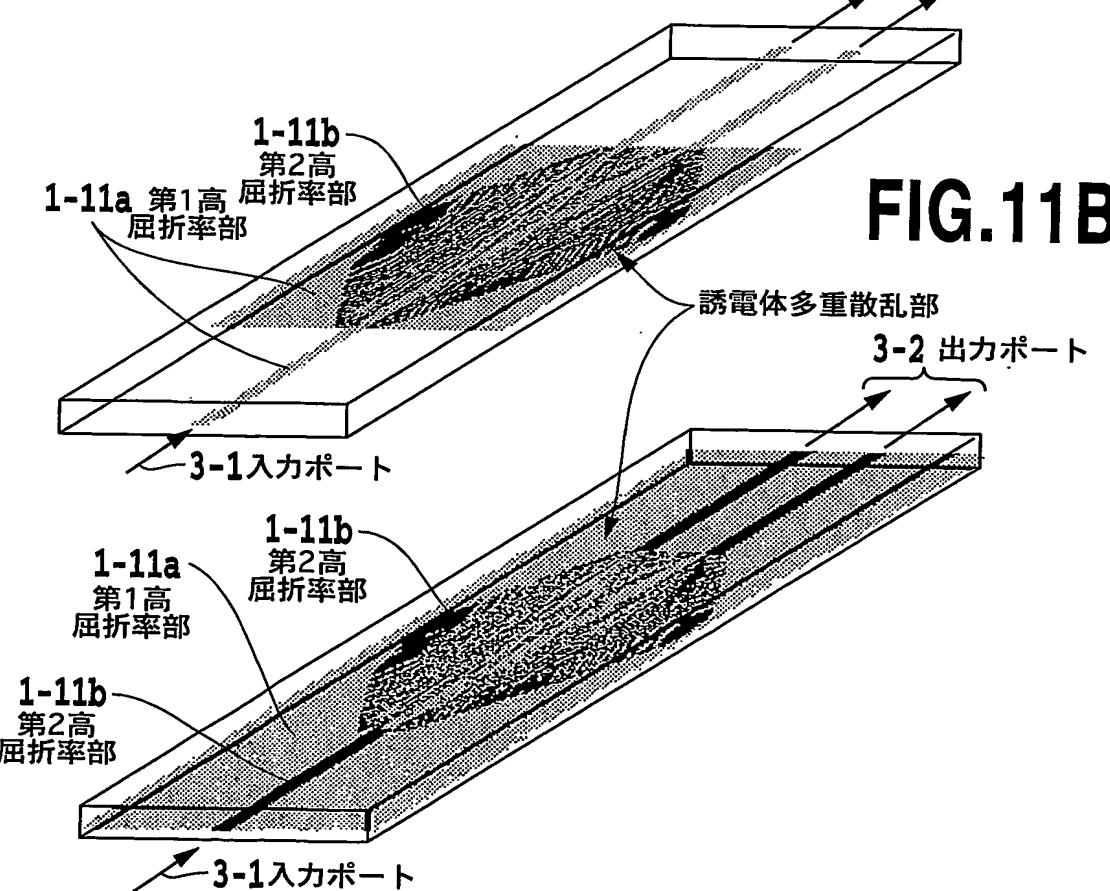
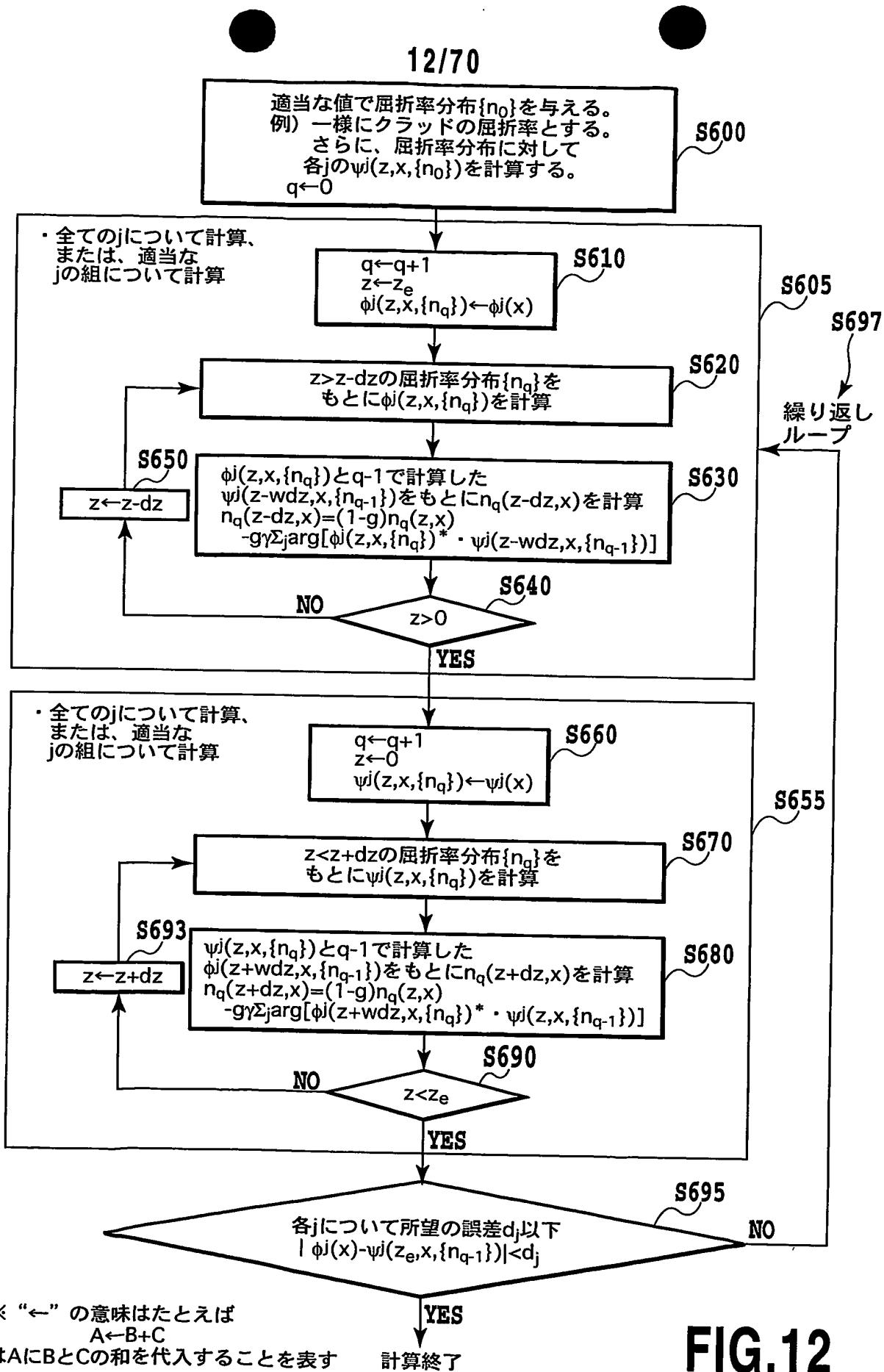
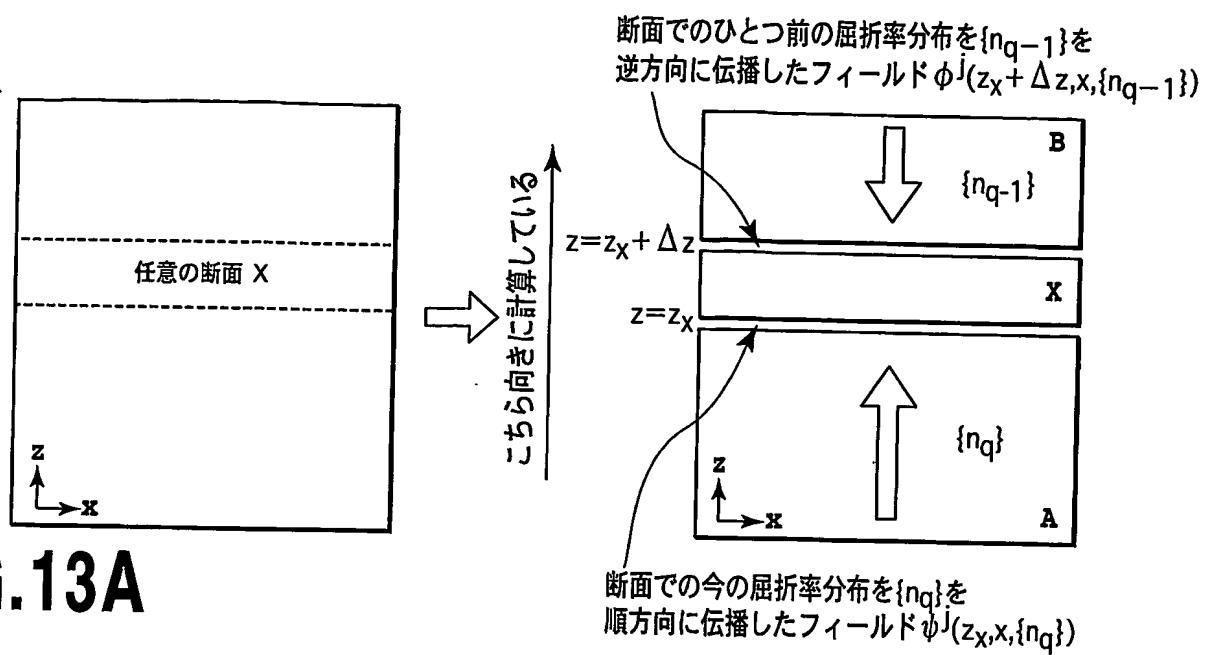
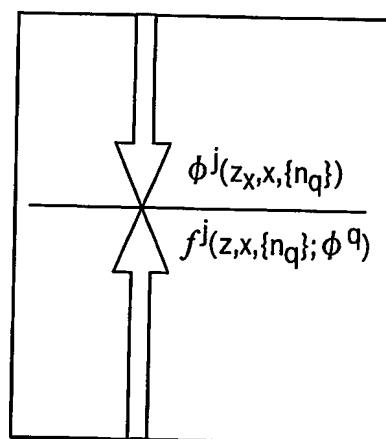
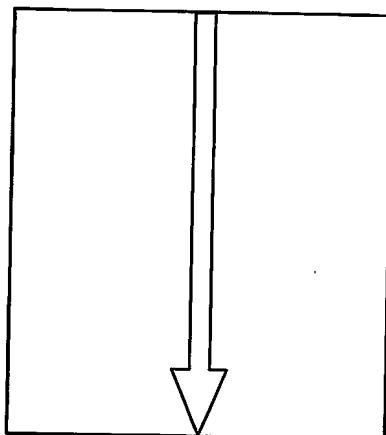


FIG. 11C

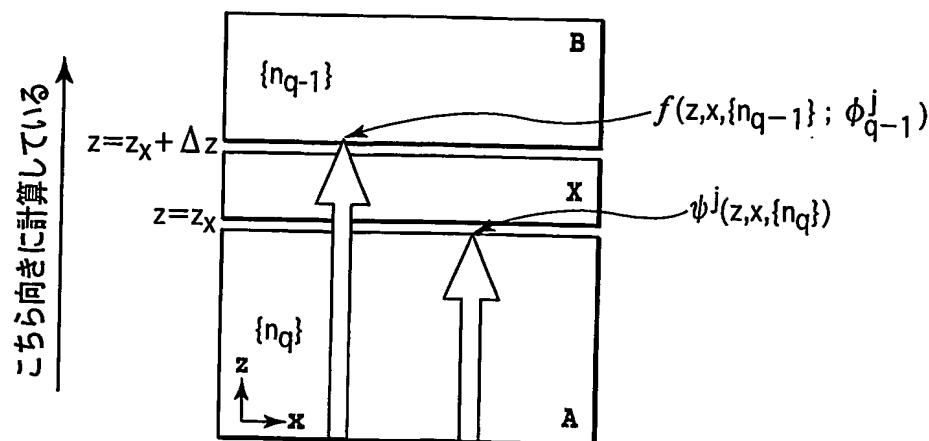


13/70

**FIG.13A****FIG.13B**

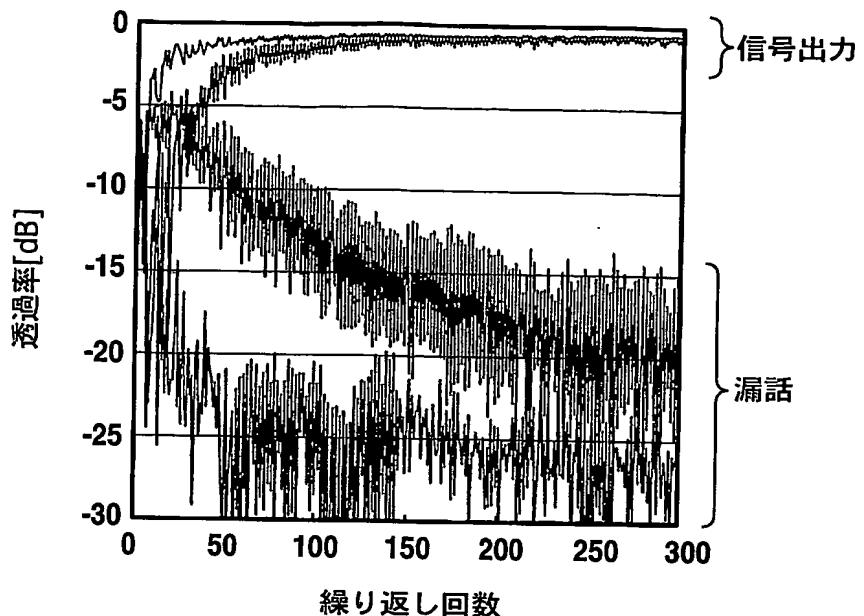
$z=0$ まで逆伝播させた出力フィールド
 $\phi^j(z=0, x, \{n_q\})$
(これを略記して ϕ^j_q と表す。)

$$f^j(z=0, x, \{n_q\}; \phi^j_q) = \phi^j(z=0, x, \{n_q\})$$

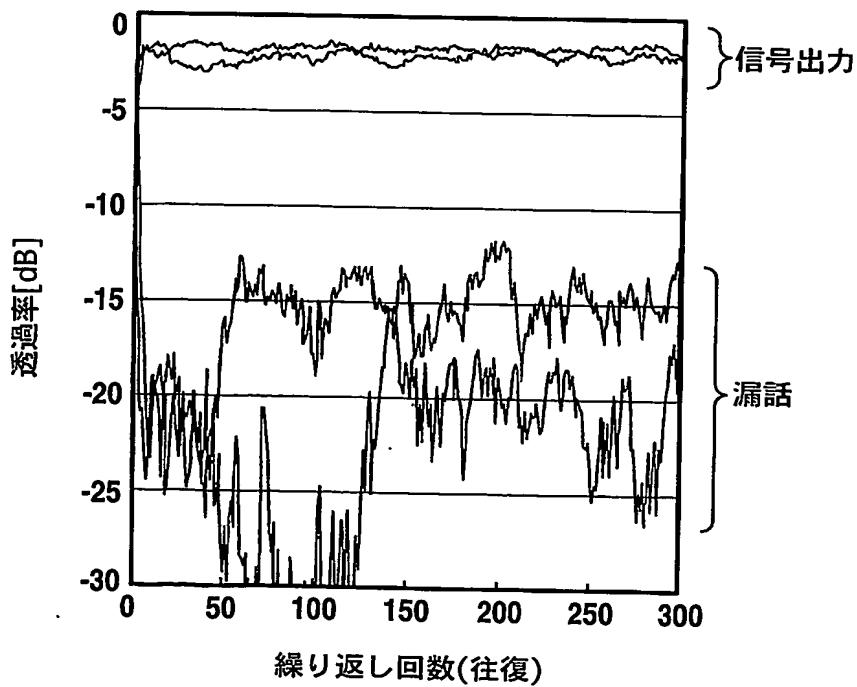
**FIG.13C**

14/70

実施例 1

FIG.14A

実施例 2

FIG.14B

15/70

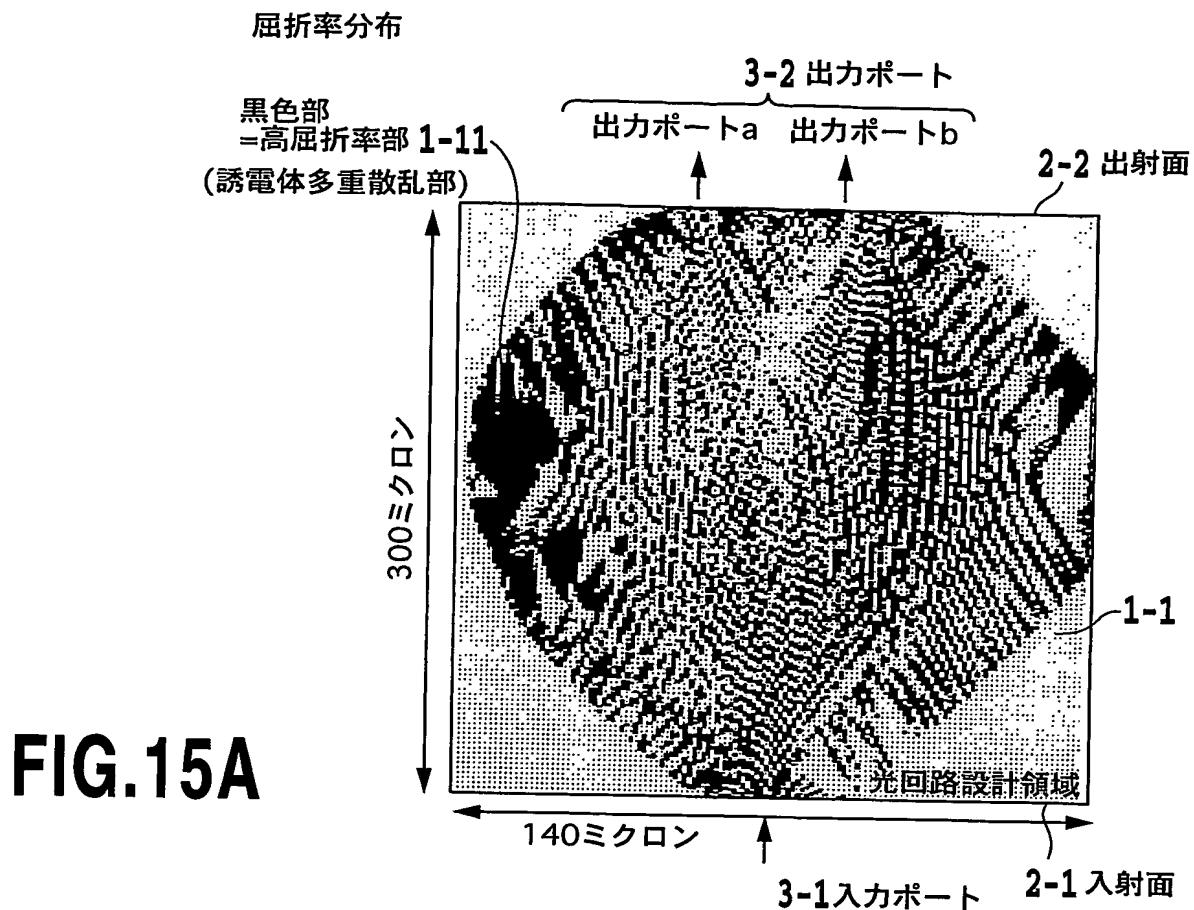


FIG.15A

透過スペクトル

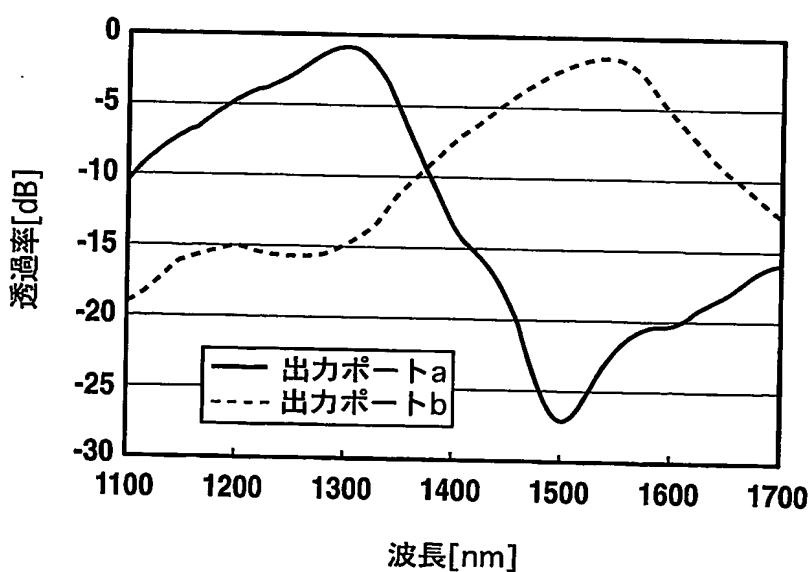


FIG.15B

16/70

TEモードのみの設定

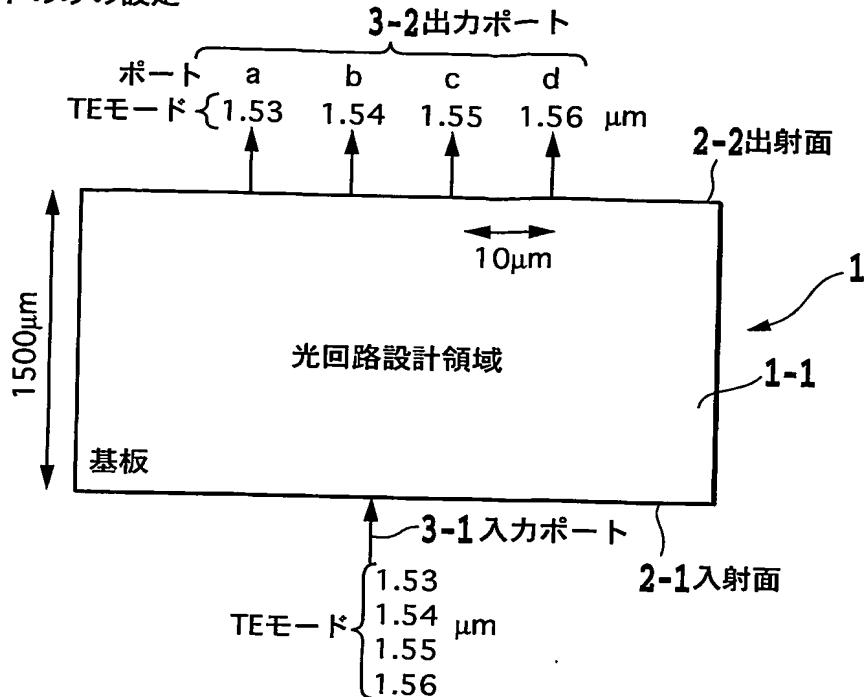


FIG.16A

TMモードを加えた設定

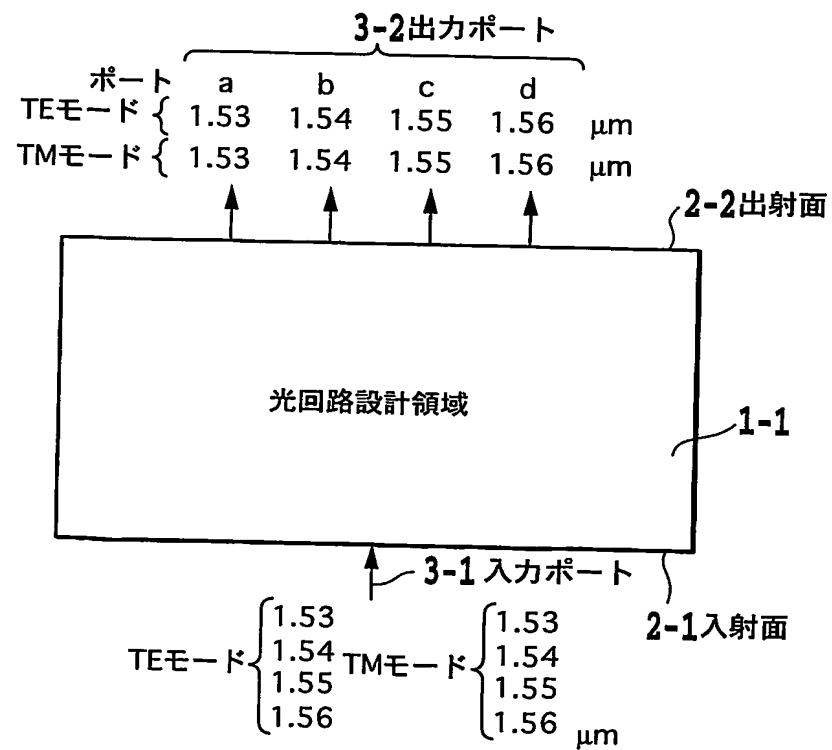


FIG.16B

17/70

TEモードのみで光回路を設計した場合

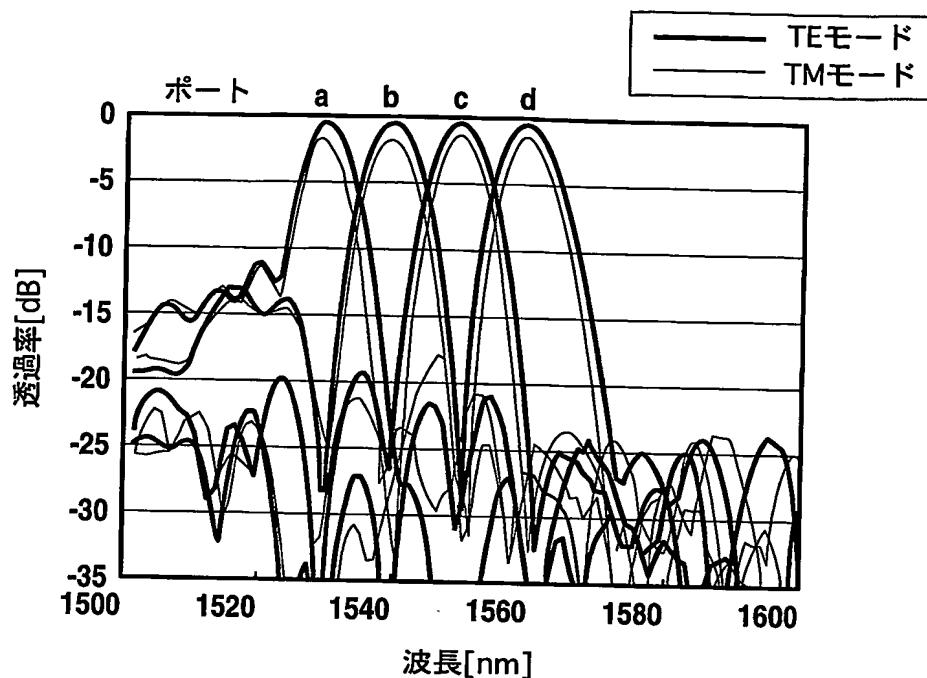


FIG.17A

TEモードとTMモードで光回路を設計した場合

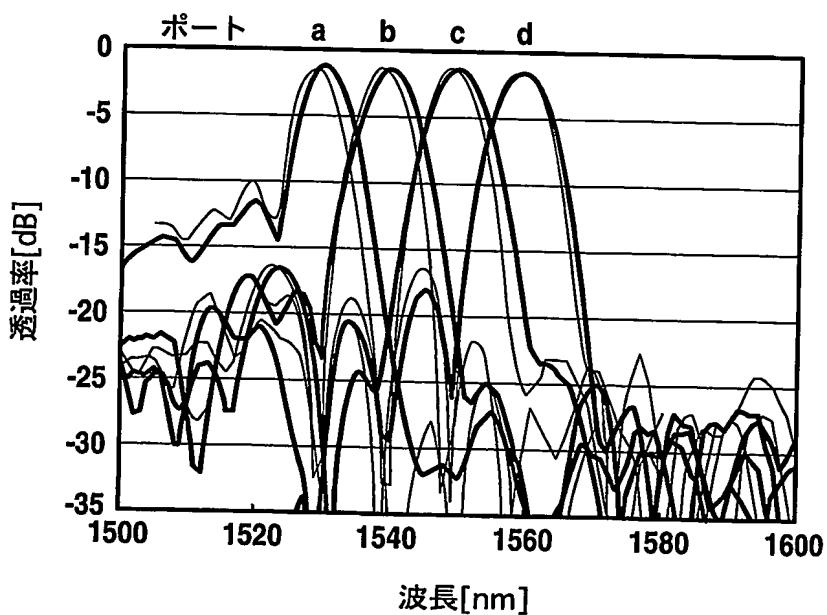


FIG.17B

18/70

単純なバンド透過フィルタの設定

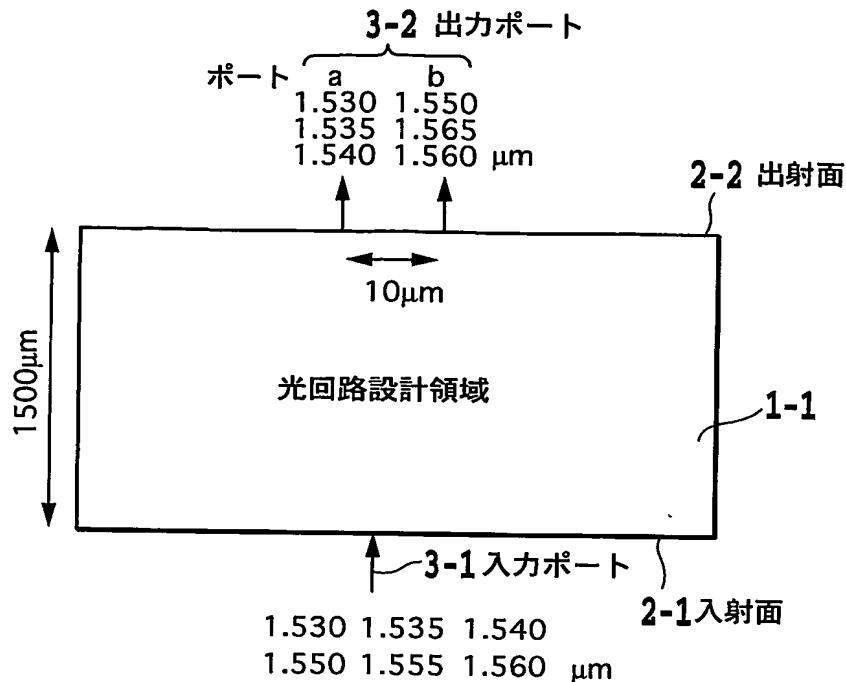


FIG.18A

バンドを整形用のダミーポートcを加えた場合

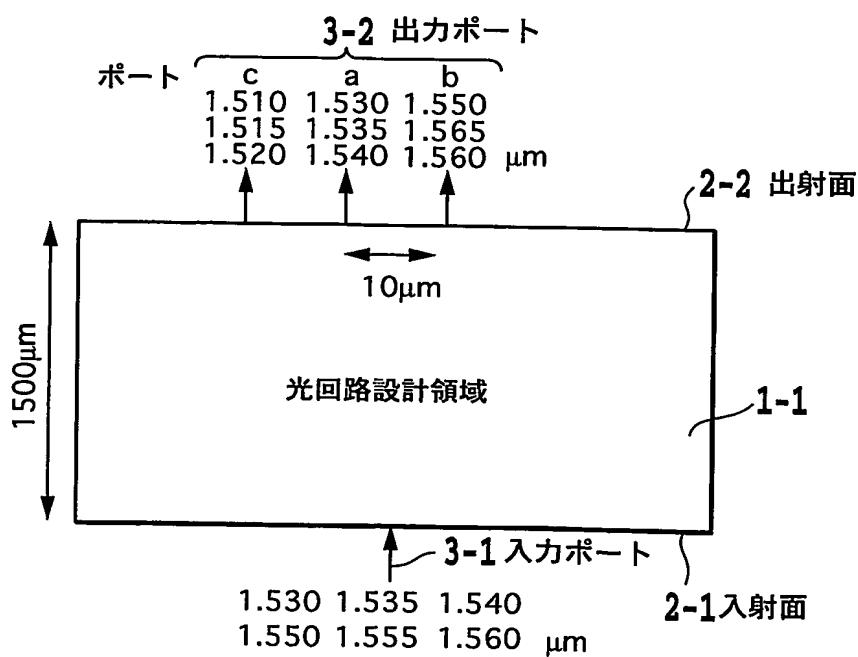


FIG.18B

19/70

単純な帯域透過フィルタの設定でのスペクトル

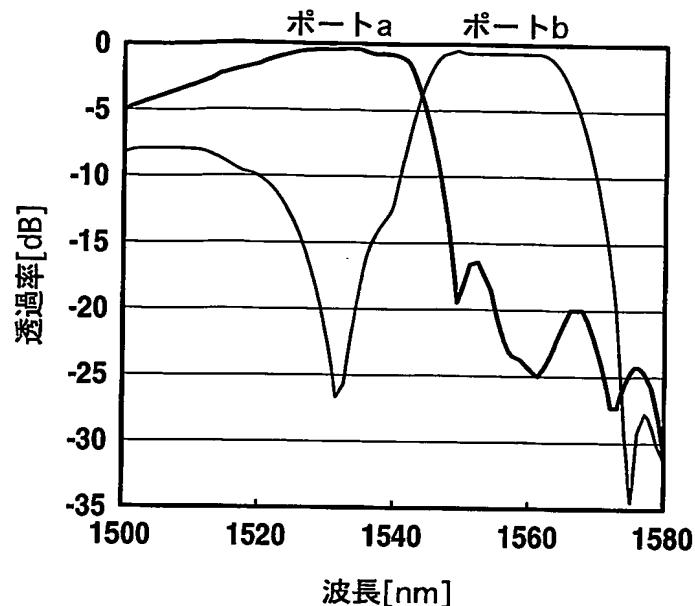


FIG.19A

帯域整形用のダミーポートcを加えた場合の透過スペクトル

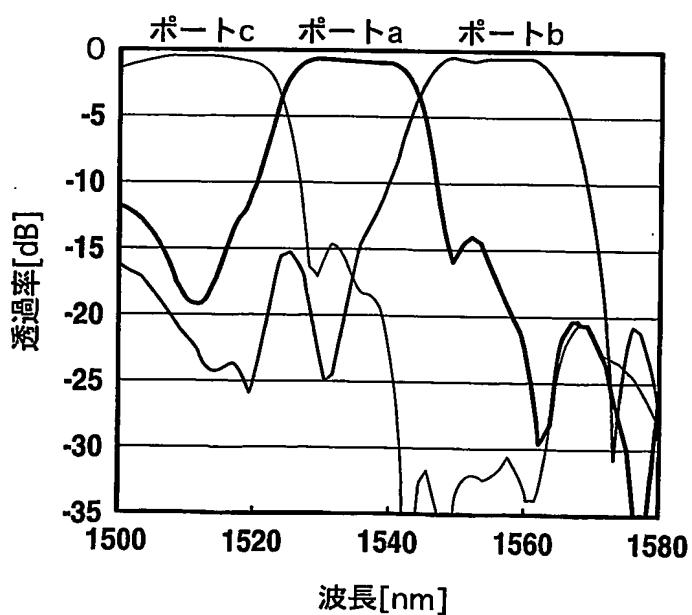


FIG.19B

20/70

帯域透過フィルタの出力ポートの設定

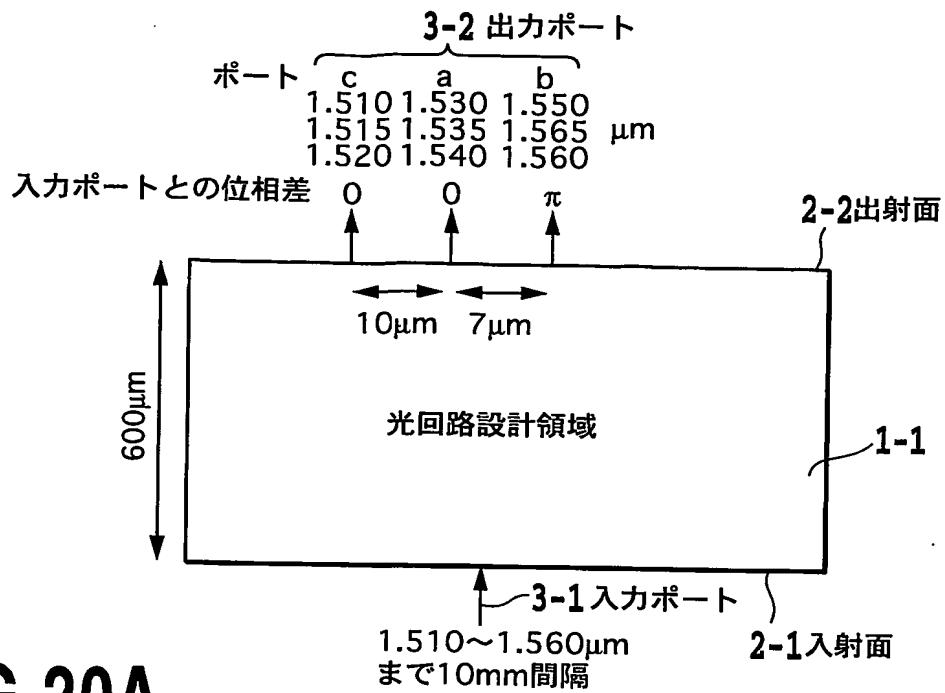


FIG.20A

透過スペクトル

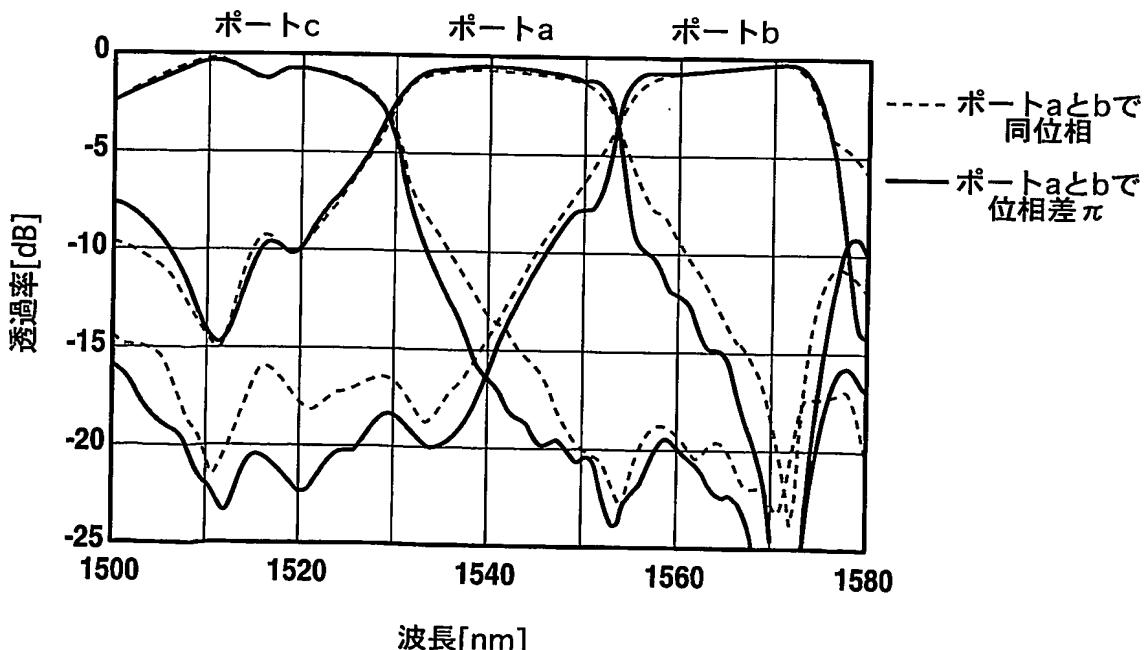
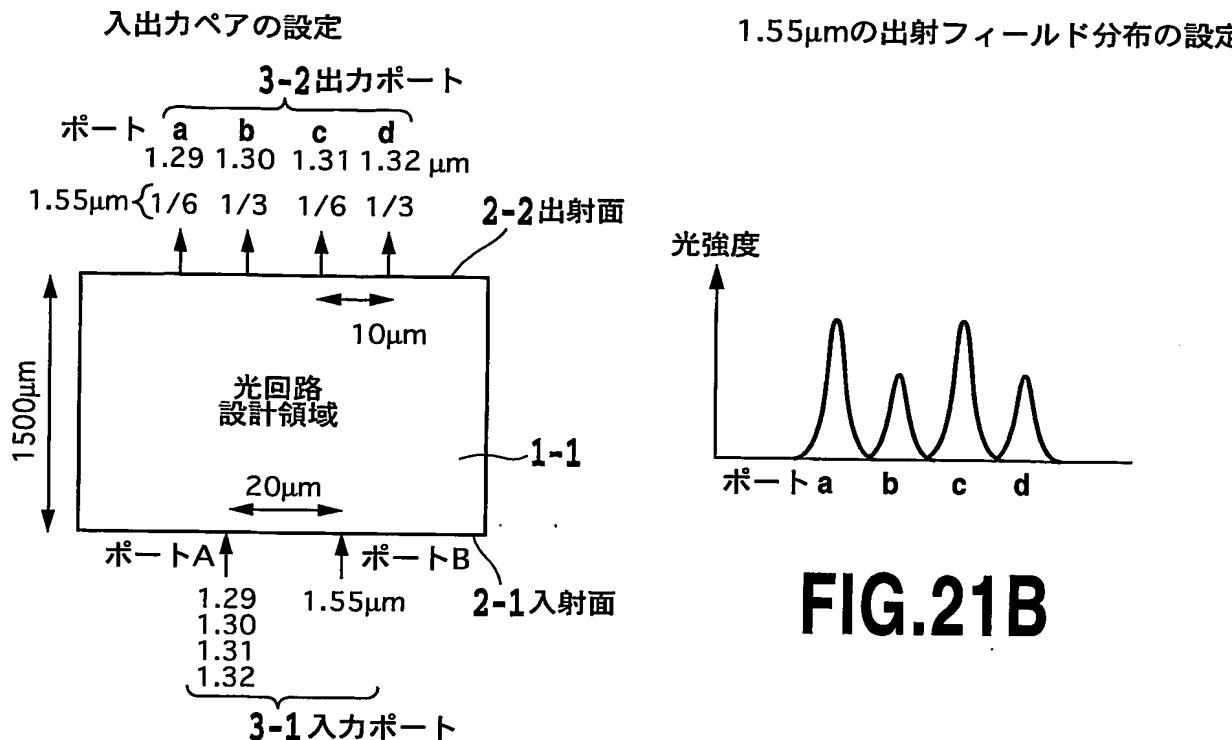
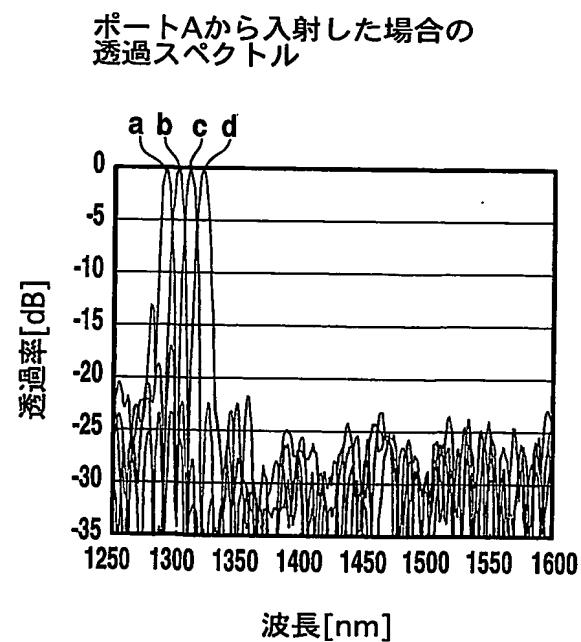
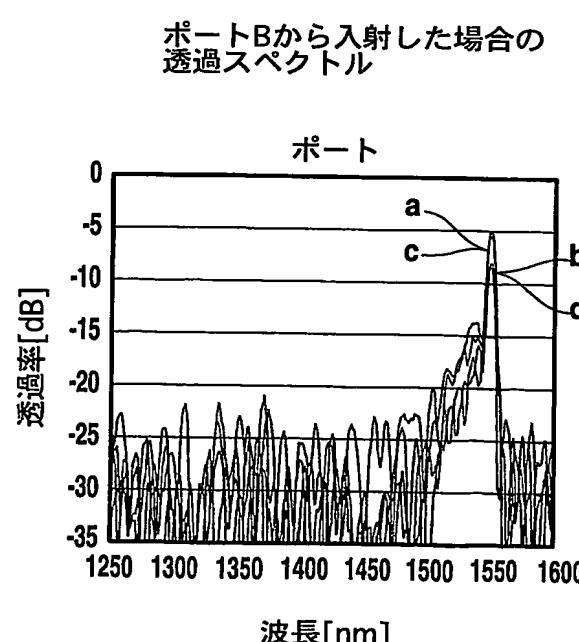


FIG.20B

**FIG.21A****FIG.21C****FIG.21D**

22/70

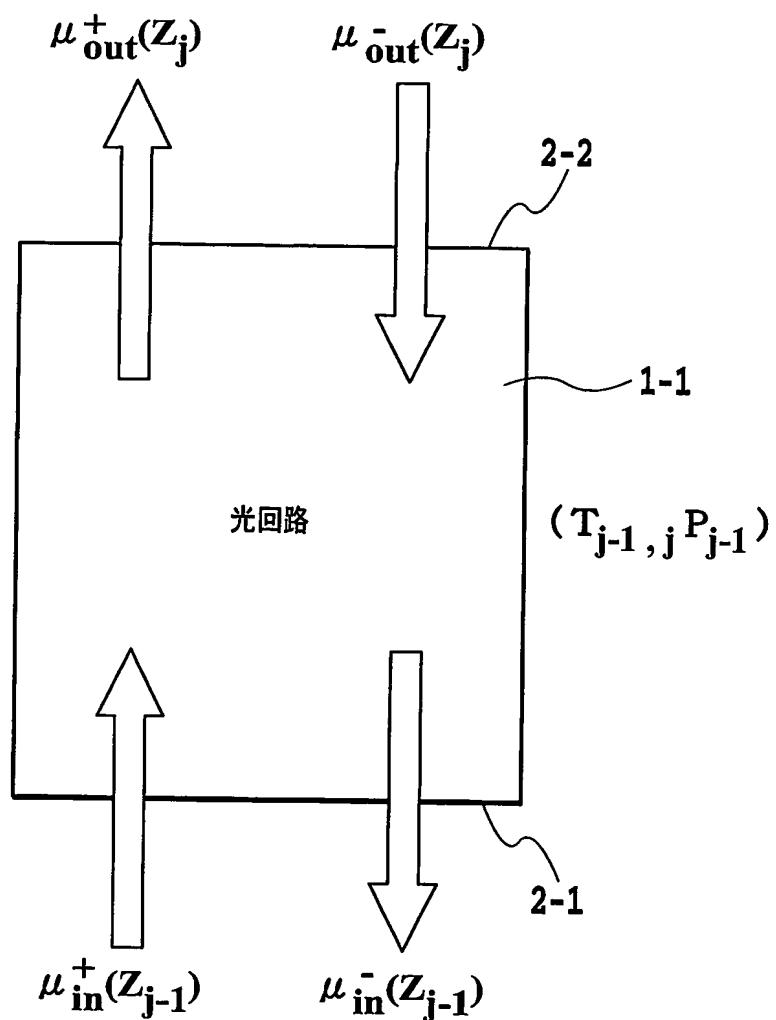
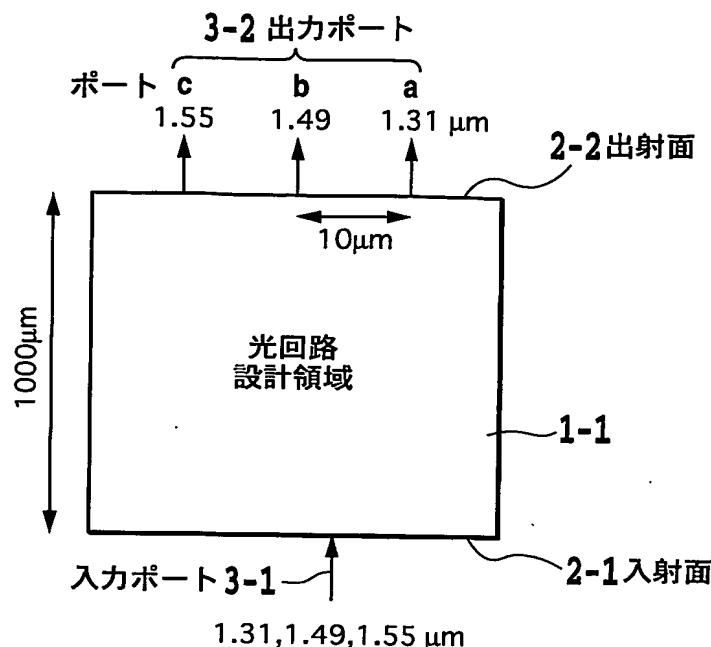
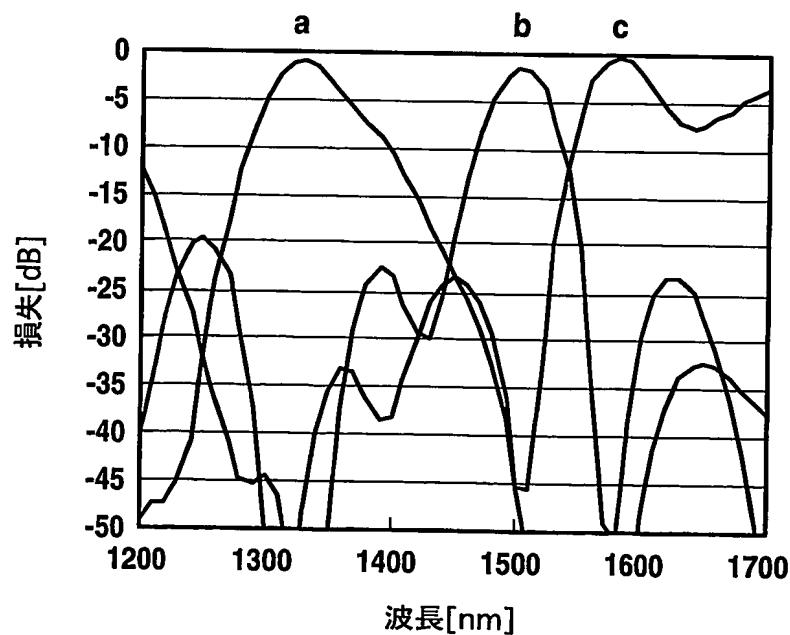


FIG.22

23/70

**FIG.23A****FIG.23B**

24/70

屈折率分布の様子

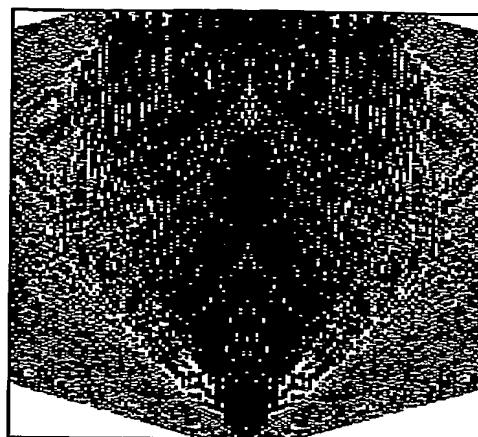


FIG.24A

光の伝搬の様子

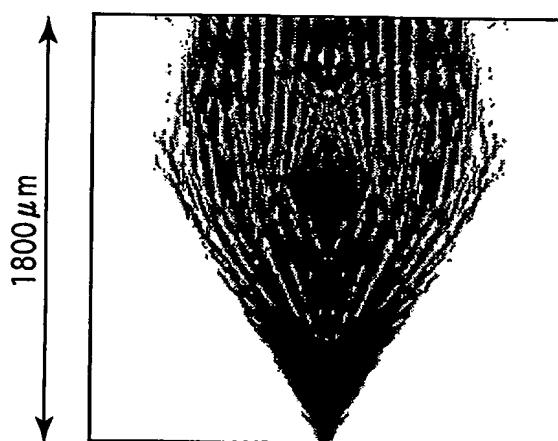


FIG.24B

各ポートの透過損失

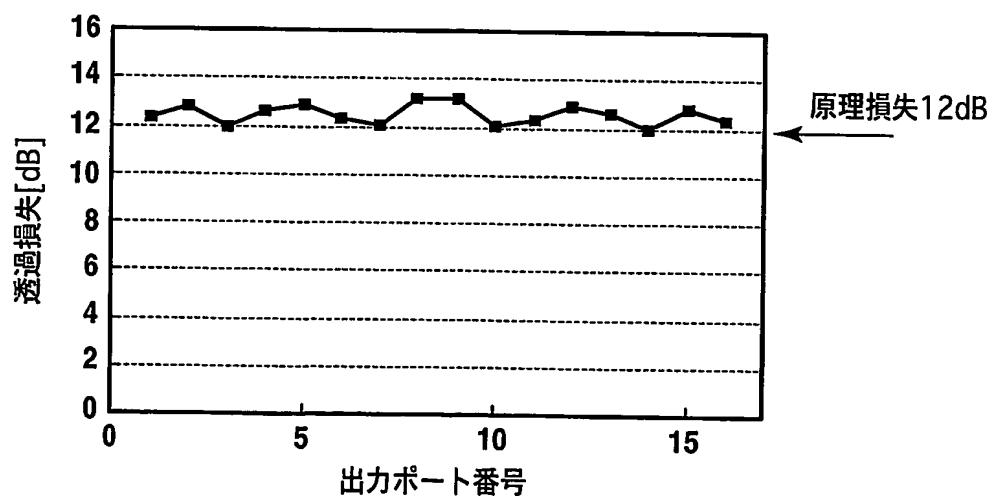
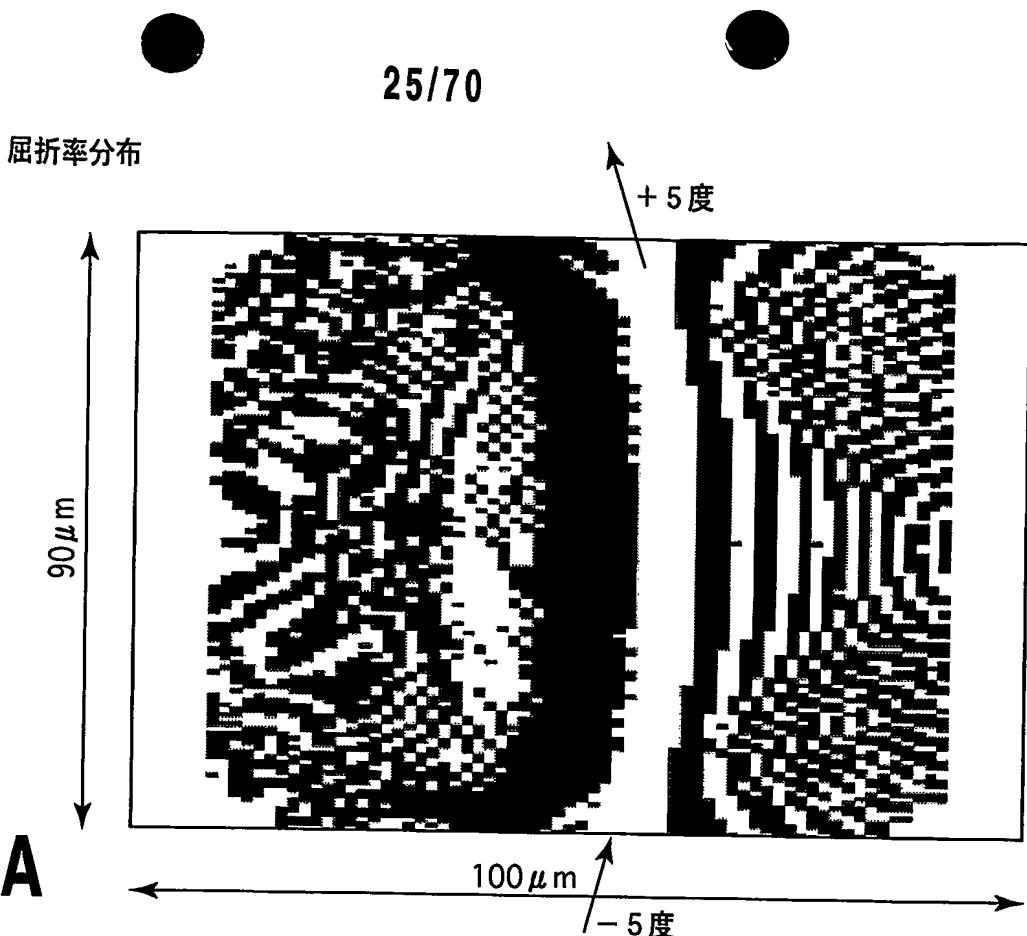
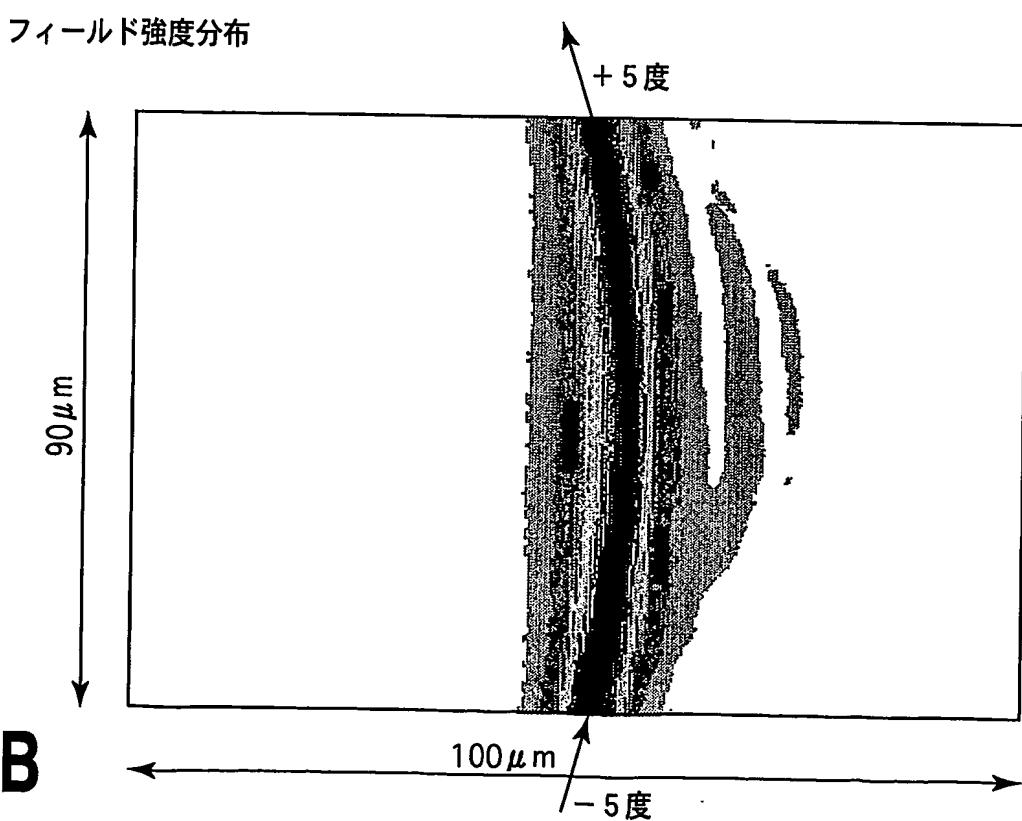
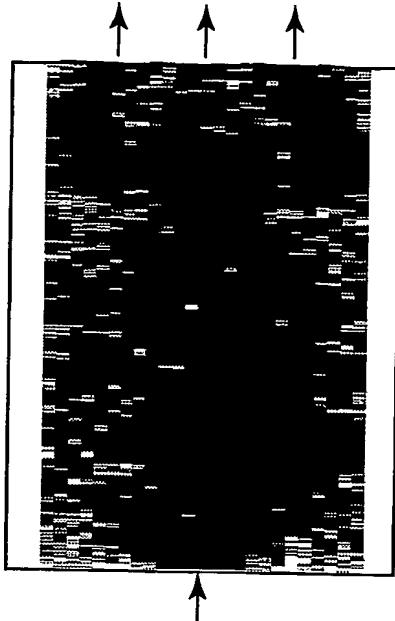


FIG.24C

FIG.25A**FIG.25B**

26/70

屈折率分布



1.31/1.49/1.55 μm
WDMスプリッタ

FIG.26A

フィールドの伝搬の様子

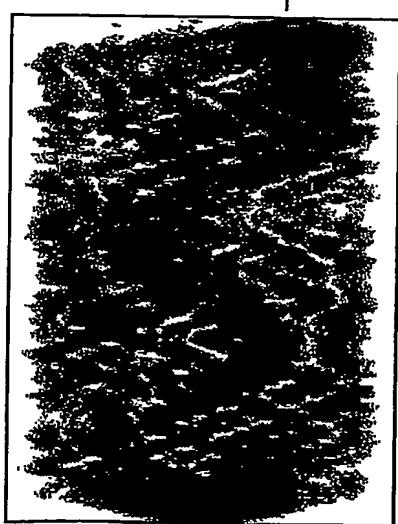
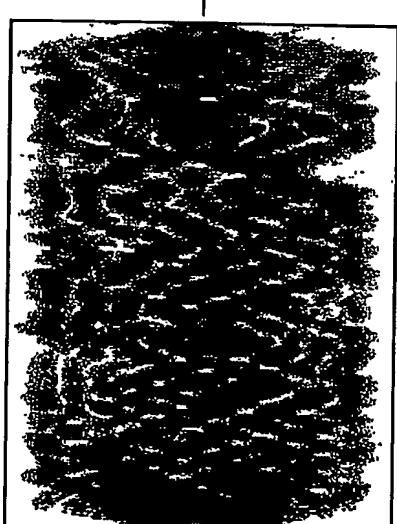
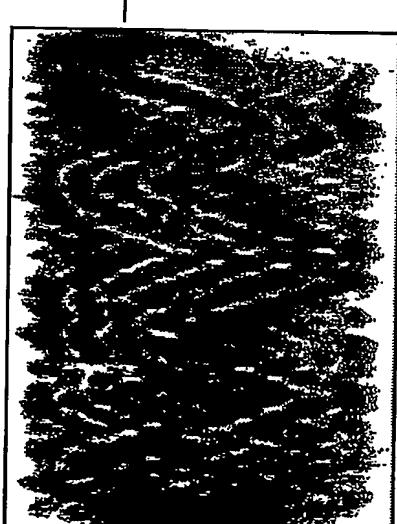
1.31 μm (b₁)1.49 μm (b₂)1.55 μm (b₃)

FIG.26B

27/70

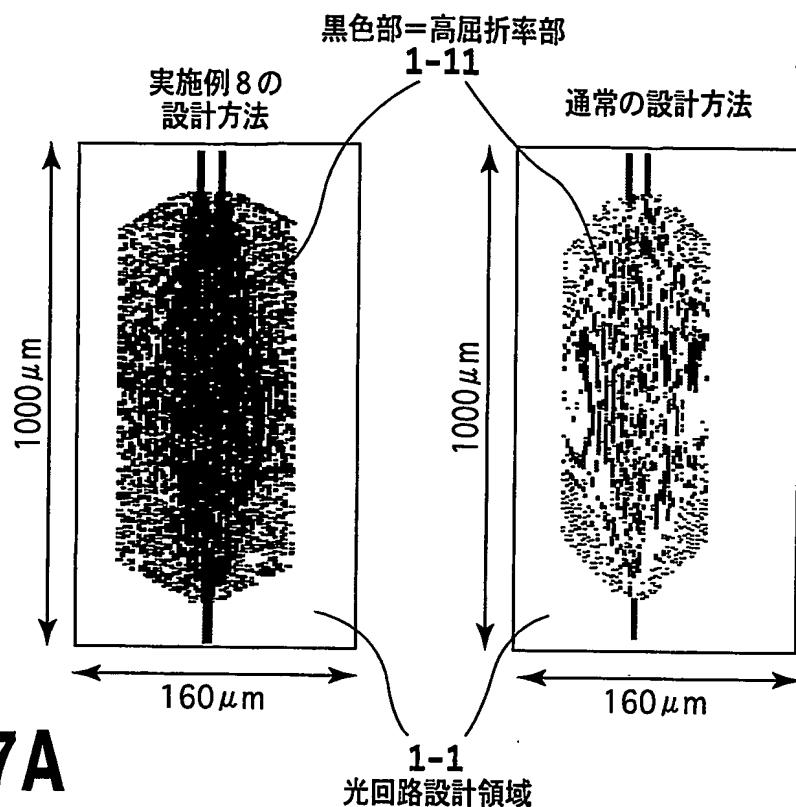


FIG.27A

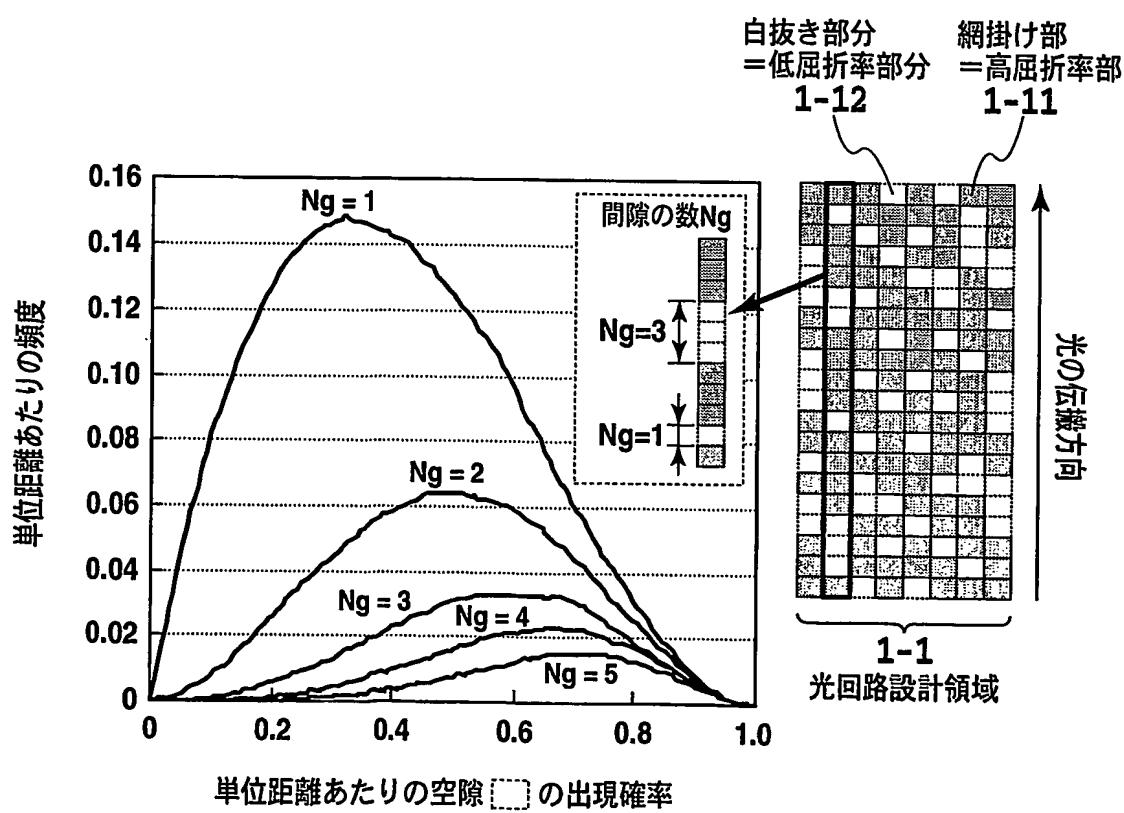


FIG.27B

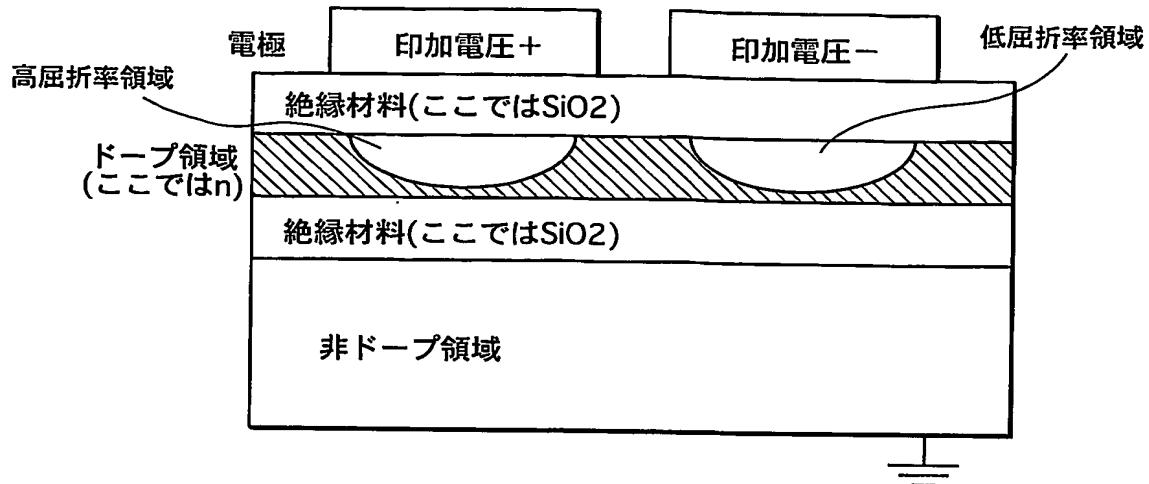


FIG.28A

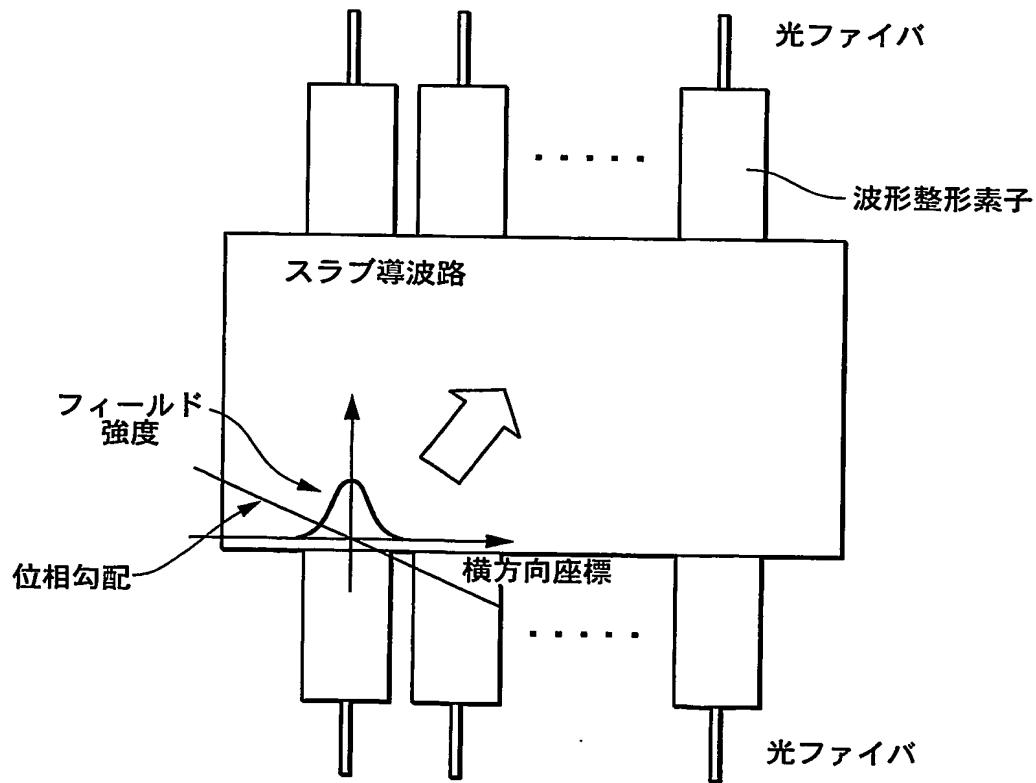


FIG.28B

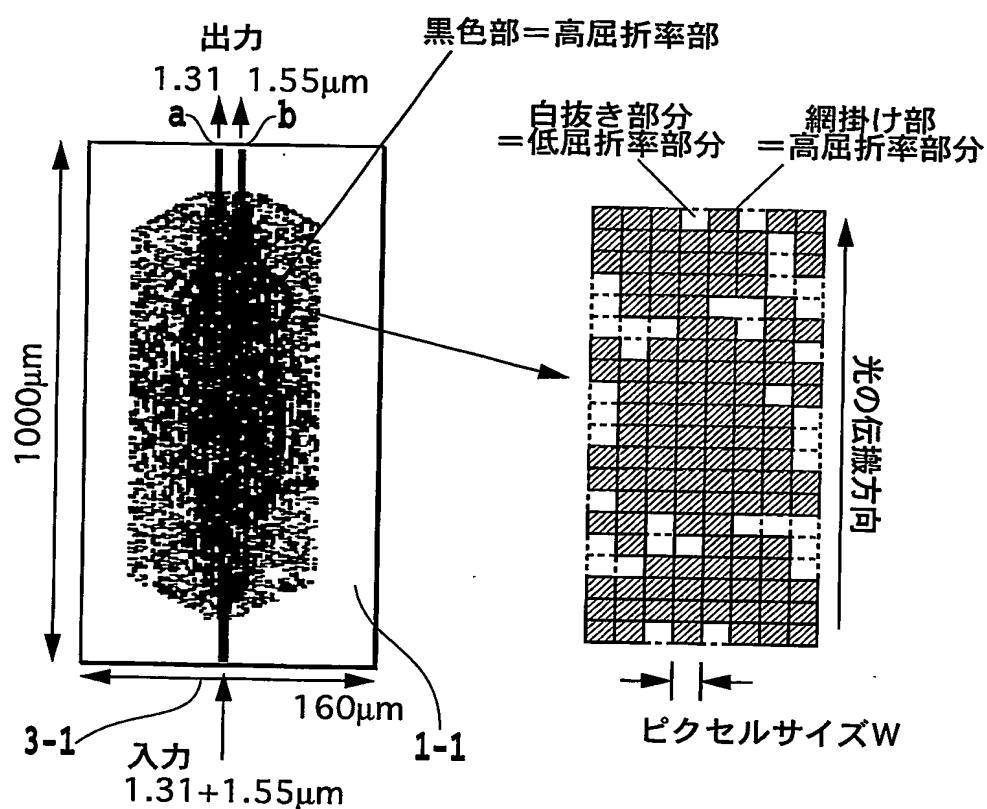


FIG.29A

FIG.29B

30/70

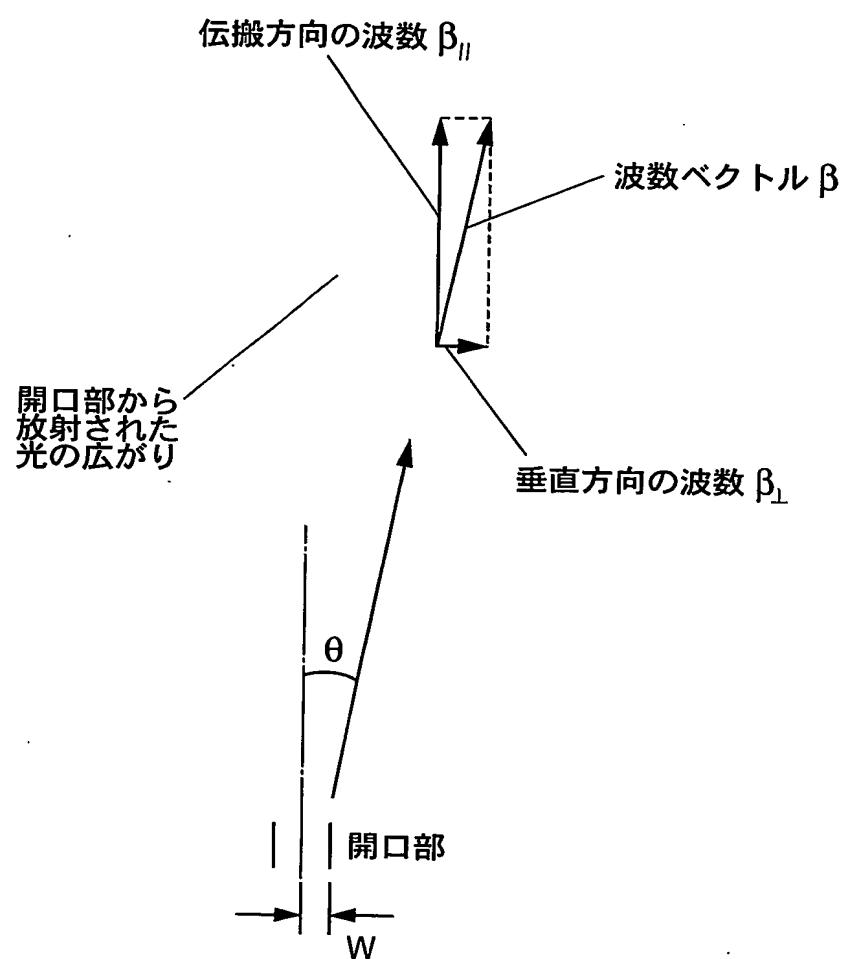


FIG.30

31/70

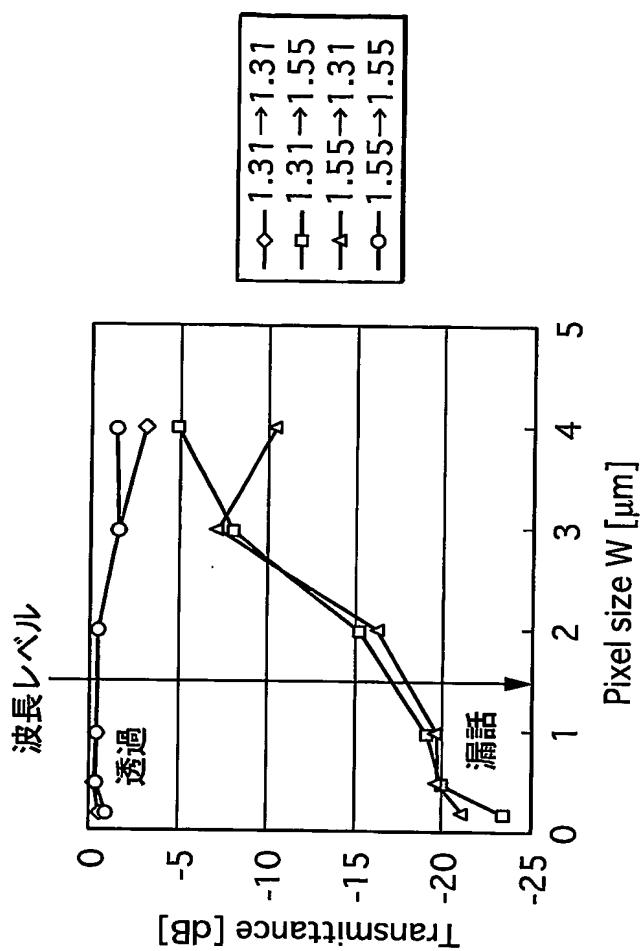


FIG.31B

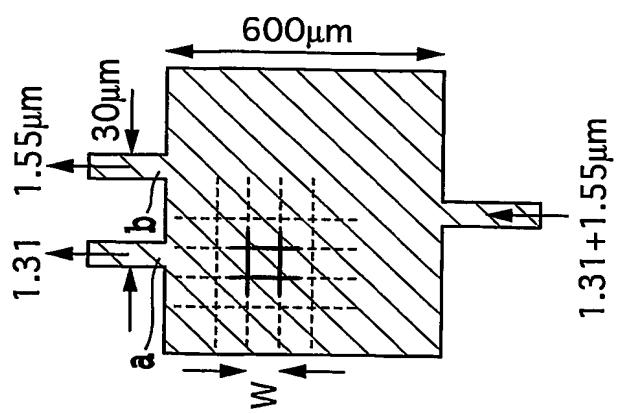


FIG.31A

32/70

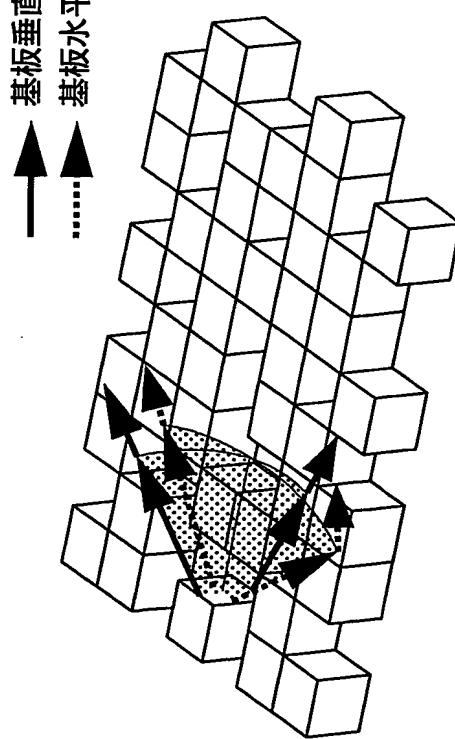
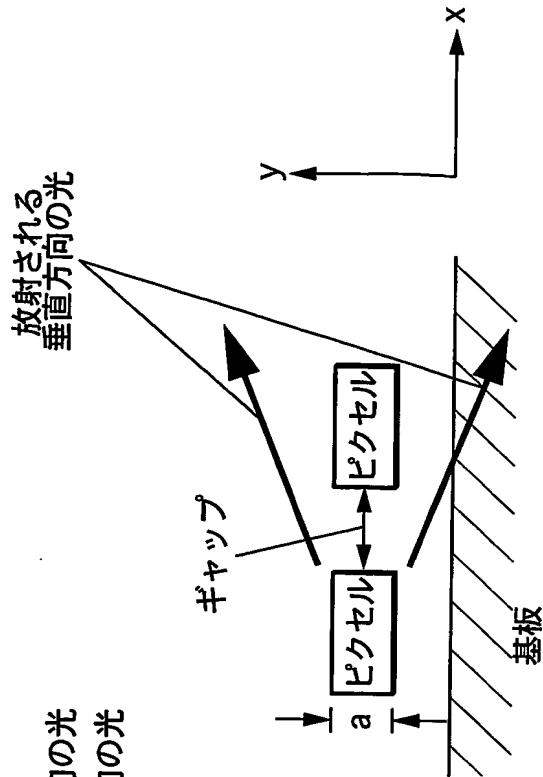


FIG.32B

FIG.32A

33/70

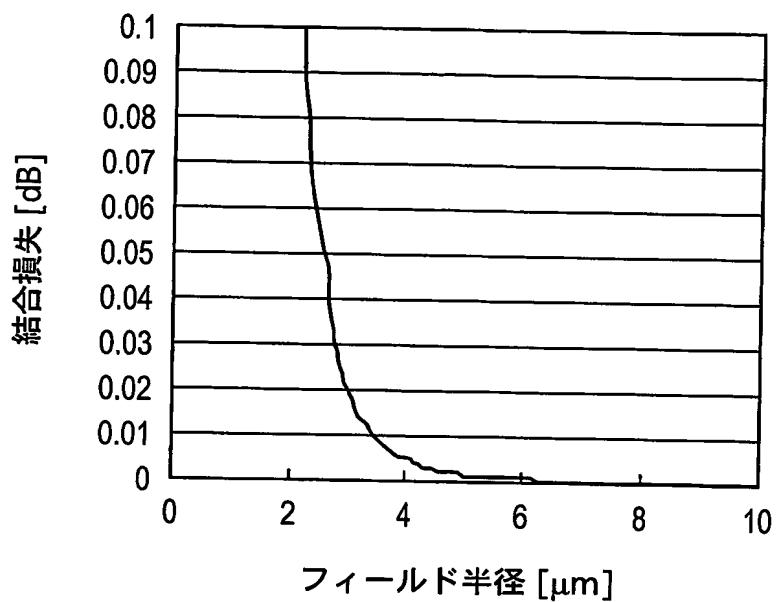
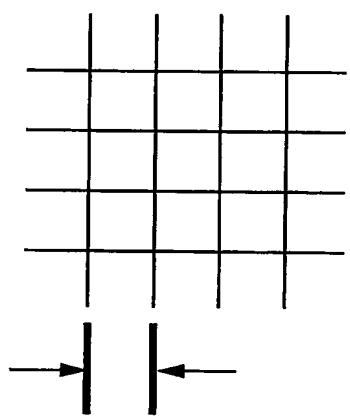
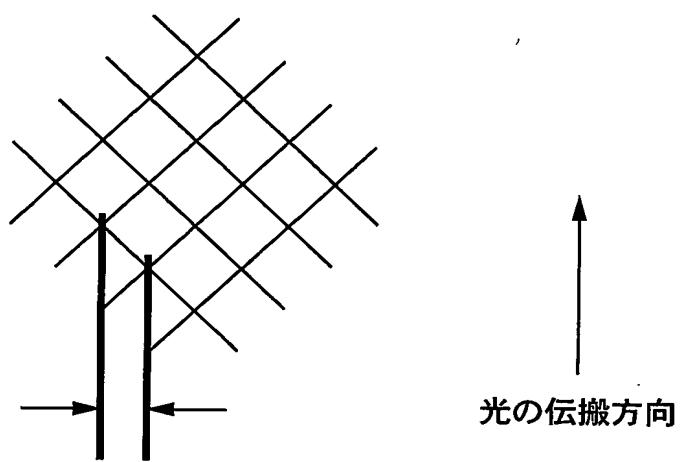


FIG.33

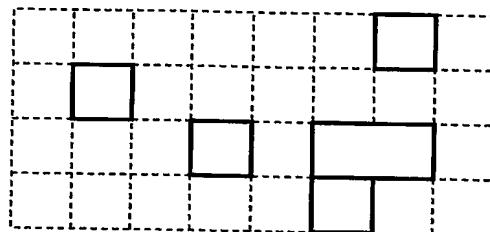
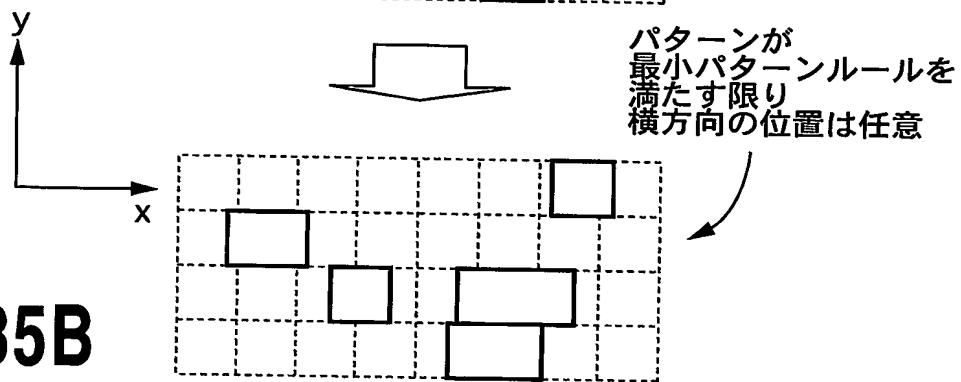


通常のピクセル配置



本実施形態のピクセル配置

FIG.34A**FIG.34B**

FIG.35A**FIG.35B**

比較的スムーズな
界面へ

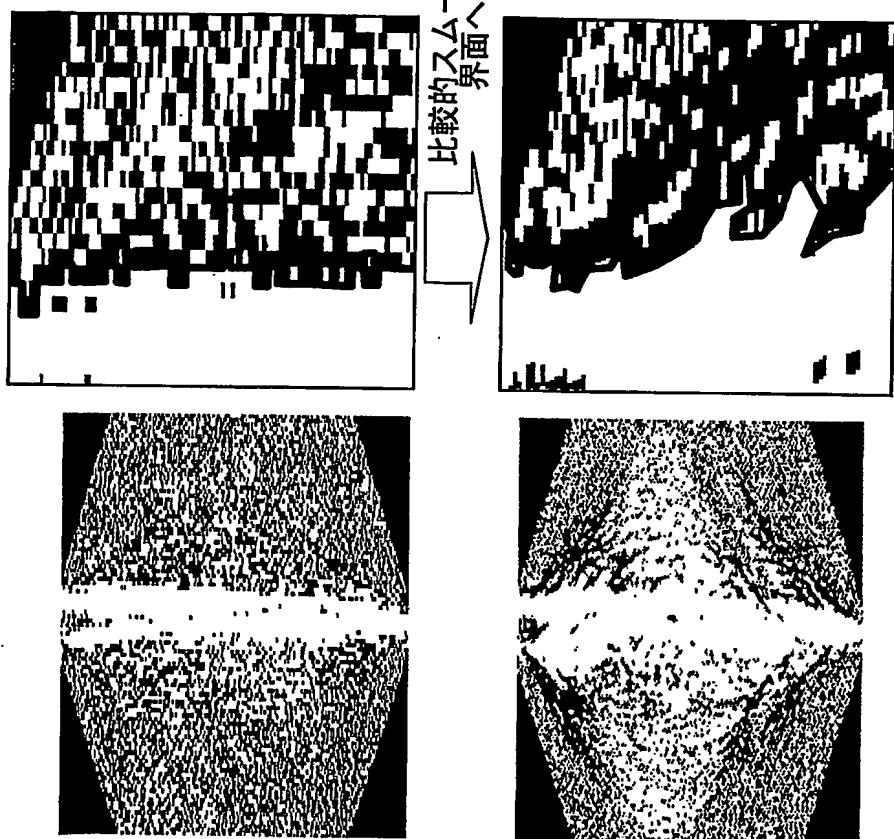
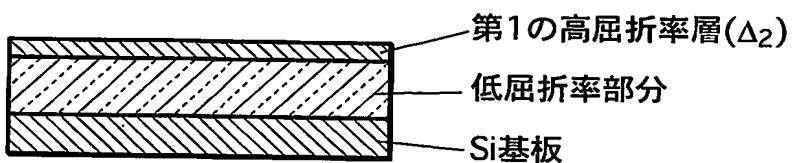
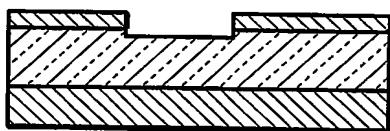
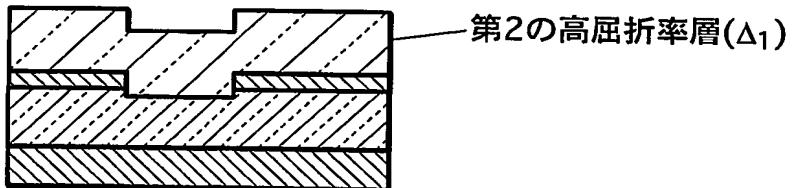


FIG.36A

FIG.36B

FIG.37A**FIG.37B****FIG.37C**

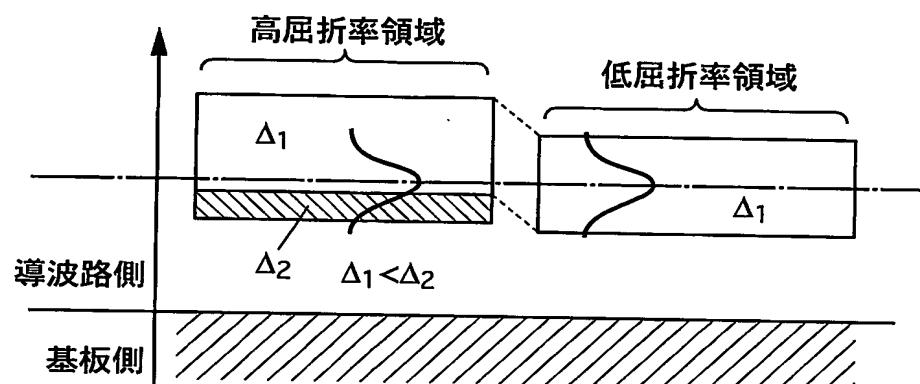
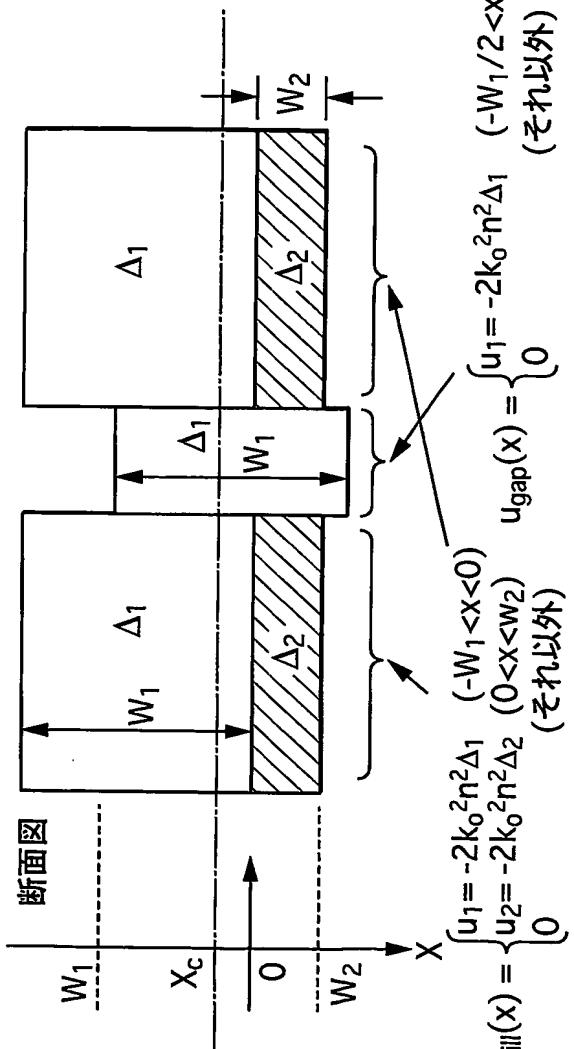


FIG.38



変分方程式 (3個)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial R_{\text{gap}}}{\partial W} = 0 \\ \frac{\partial R_{\text{fill}}}{\partial W} = 0 \\ \frac{\partial R_{\text{fill}}}{\partial W_c} = 0 \end{array} \right\}$$

$H_j = -\left(\frac{\partial}{\partial x}\right)^2 + u_j(x) \quad (j=\text{fill, gap})$ $g(x-X_c) \equiv \sqrt{\frac{2}{\pi p^2}} \exp\left[-\left(\frac{x-X_c}{W}\right)^2\right]$ $R_{\text{gap}} \equiv \int_{-\infty}^{\infty} g(x-X_c) H_{\text{gap}} g(x-X_c) dx = \left(\frac{1}{W^2}\right) + u_1 \operatorname{erf}\left(\frac{W_1}{\sqrt{2}W}\right)$ $R_{\text{fill}} \equiv \int_{-\infty}^{\infty} g(x-X_c) H_{\text{fill}} g(x-X_c) dx$ $= \frac{1}{W^2} + \frac{1}{2} \left[u_1 \operatorname{erf}\left(\sqrt{2} \frac{W_1+X_c}{W}\right) + u_2 \operatorname{erf}\left(\sqrt{2} \frac{W_2-X_c}{W}\right) + (u_2-u_1) \operatorname{erf}\left(\sqrt{2} \frac{X_c}{W}\right) \right]$

FIG.39

40/70

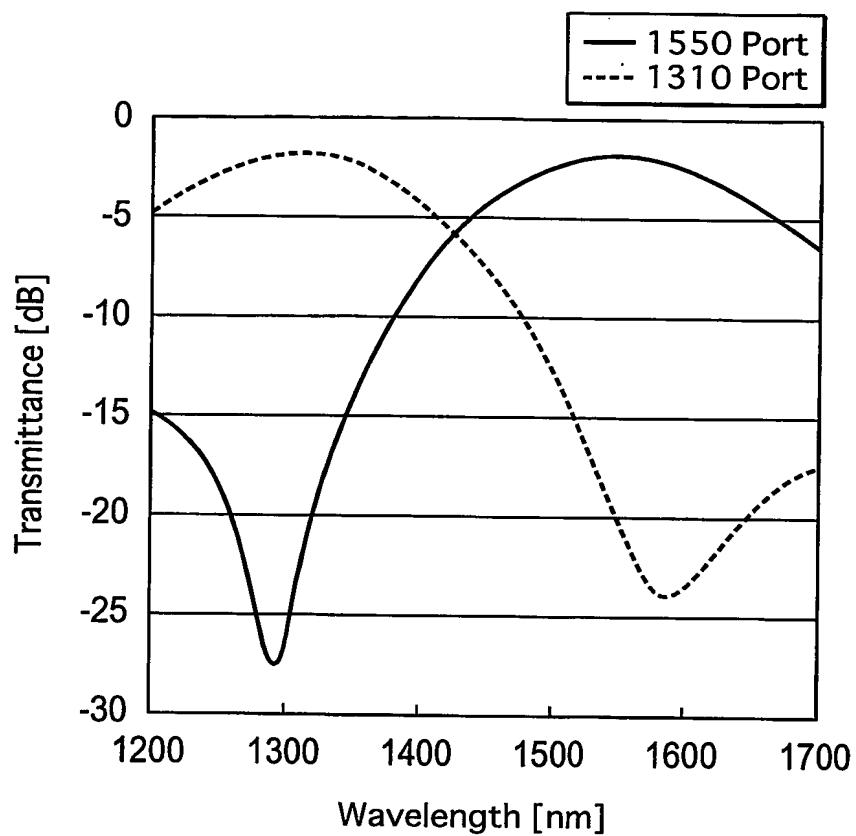
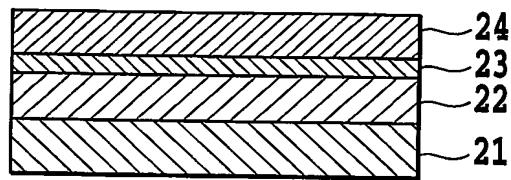
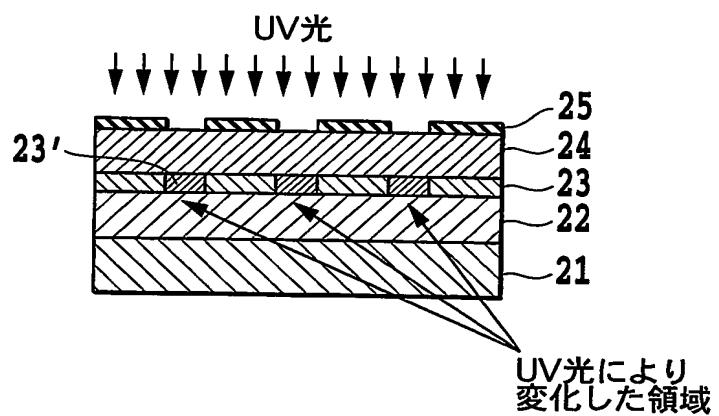
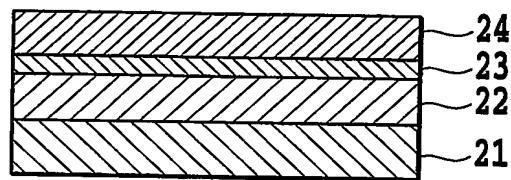
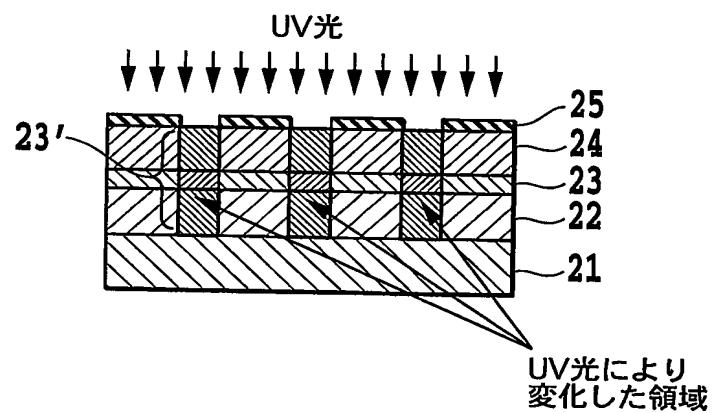


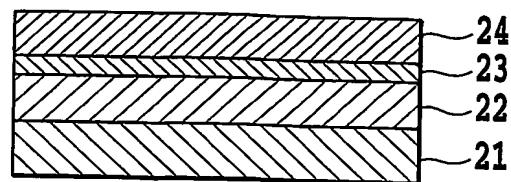
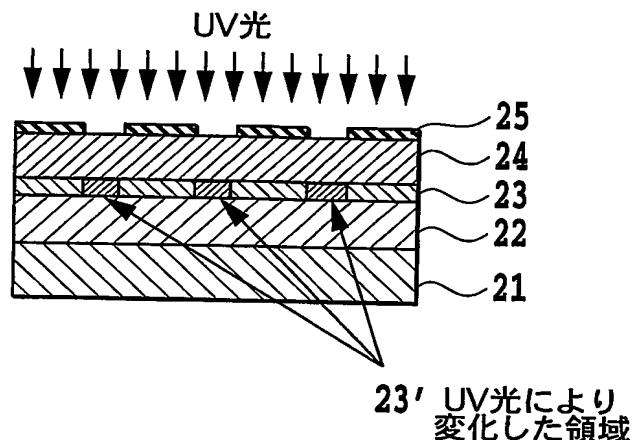
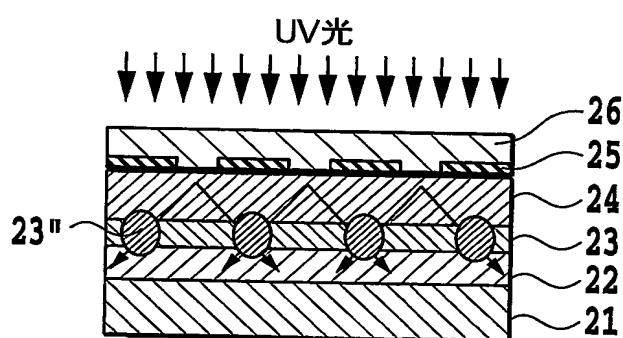
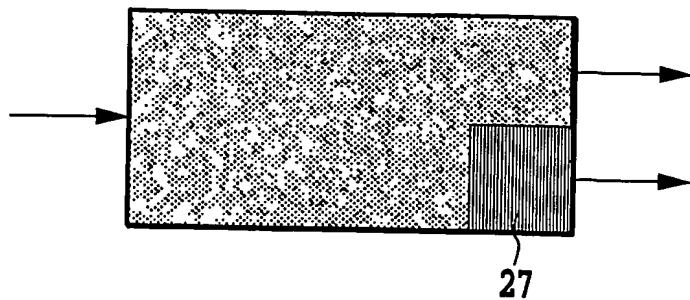
FIG.40

FIG.41A**FIG.41B**

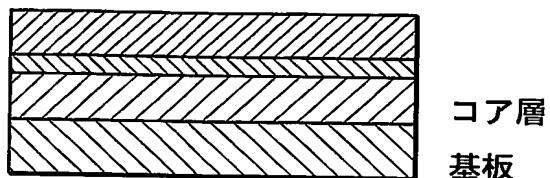
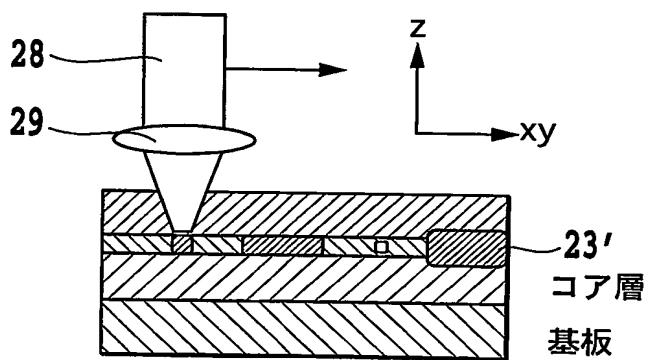
42/70

FIG.42A**FIG.42B**

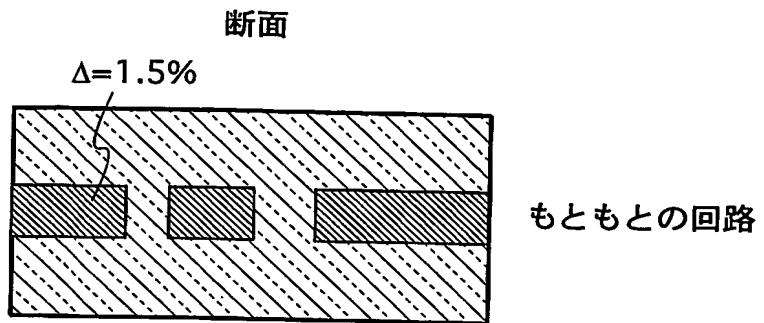
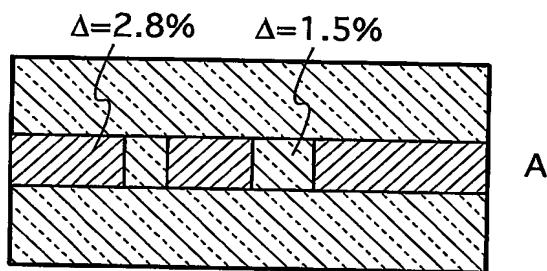
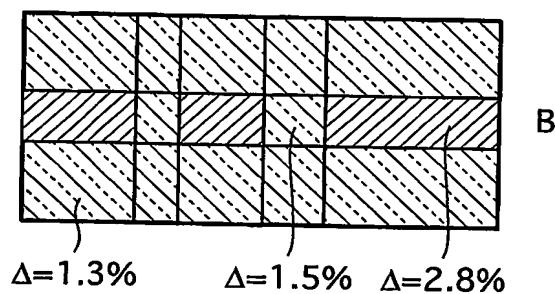
43/70

FIG.43A**FIG.43B****FIG.43C****FIG.43D**

44/70

FIG.44A**FIG.44B**

45/70

FIG.45A**FIG.45B****FIG.45C**

46/70

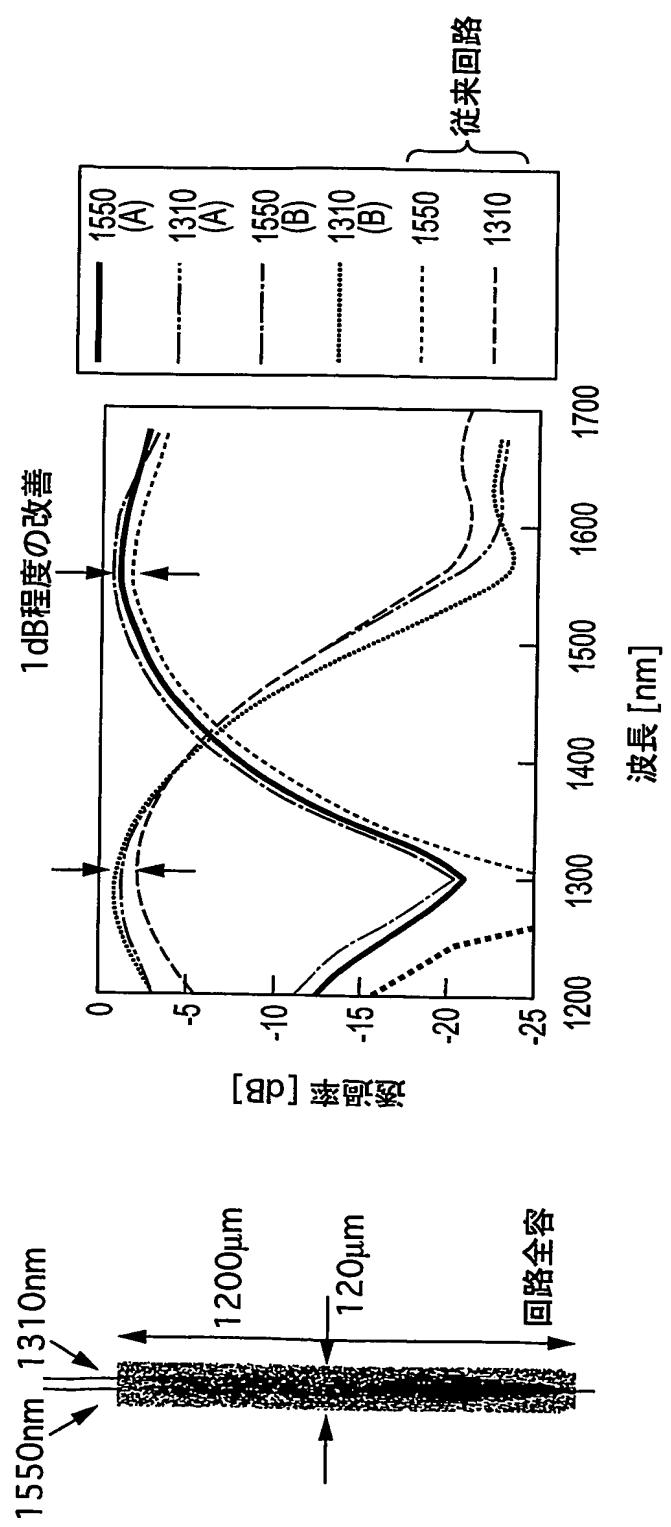


FIG.46

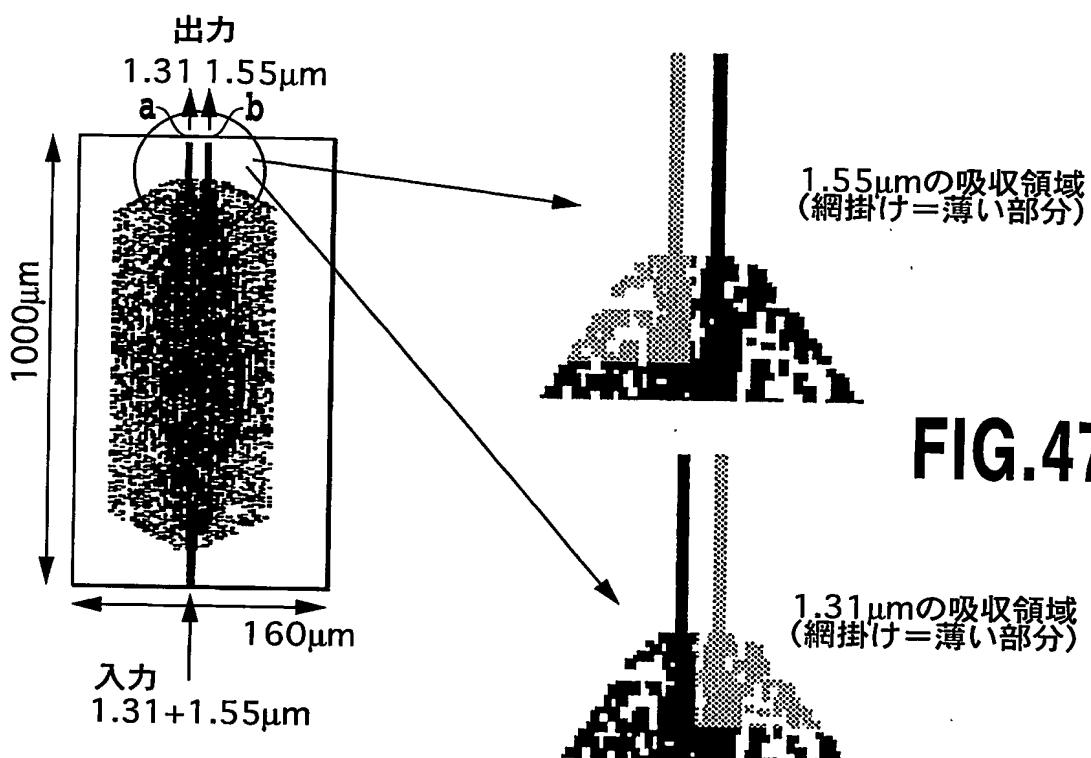
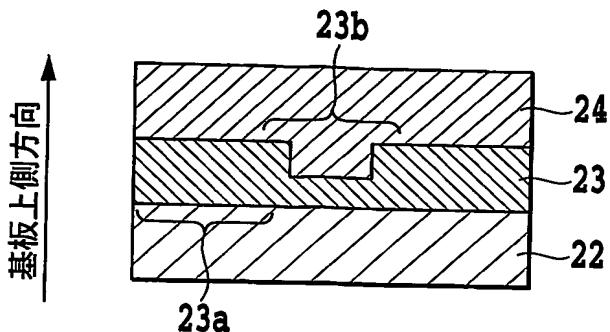
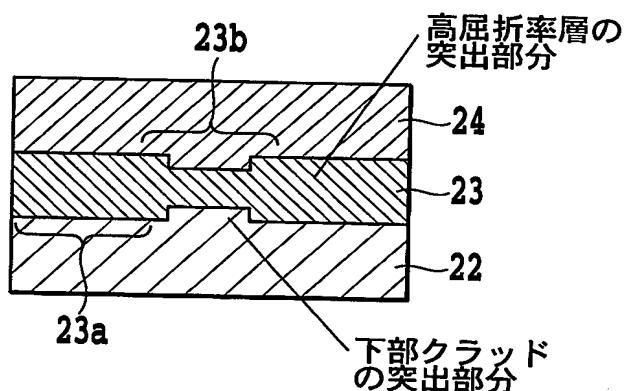
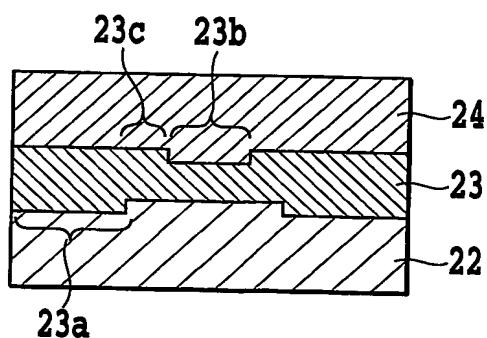


FIG.47A

FIG.47C

FIG.47B

48/70

FIG.48A**FIG.48B****FIG.48C**

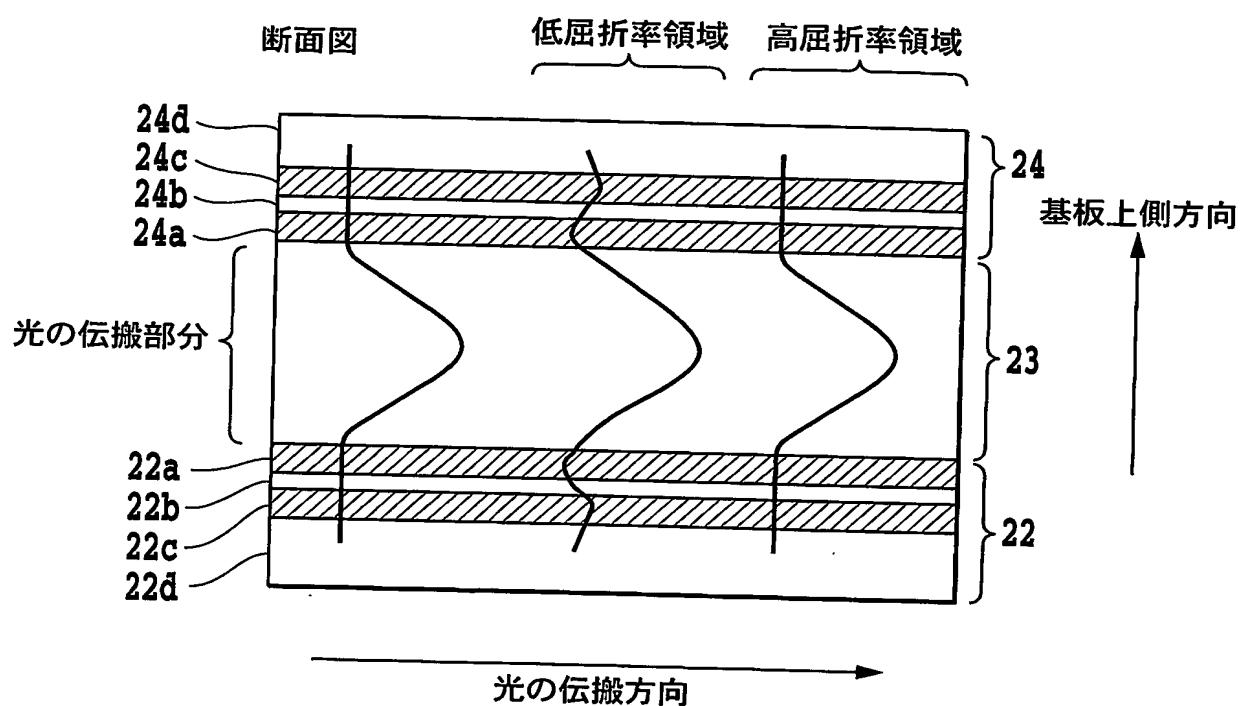
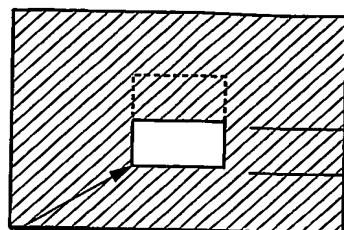


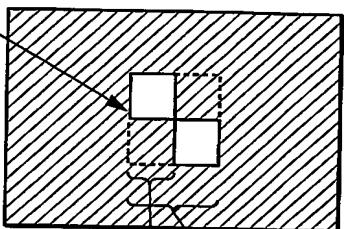
FIG.49

FIG.50A

ピクセルを2分割した例

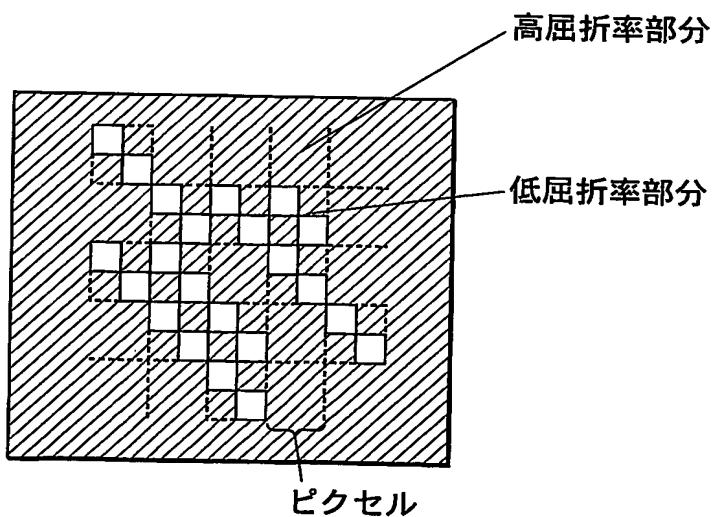
FIG.50B

実効的に
低屈折率



ピクセルを4分割した例

ピクセル
サブピクセル

FIG.50C

高屈折率部分

低屈折率部分

ピクセル

有効伝搬定数の伝搬方向による反射

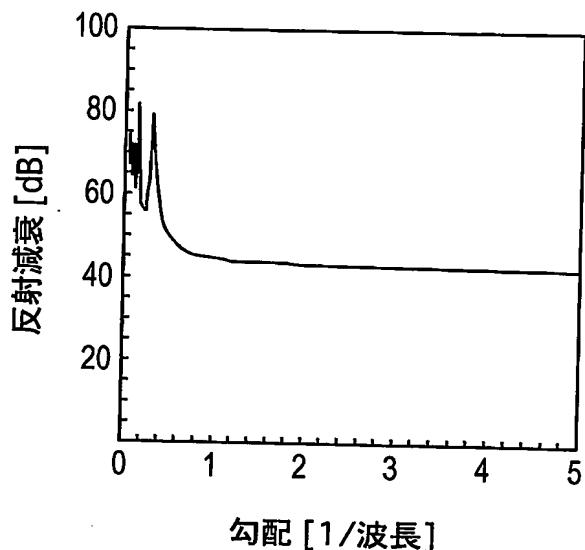
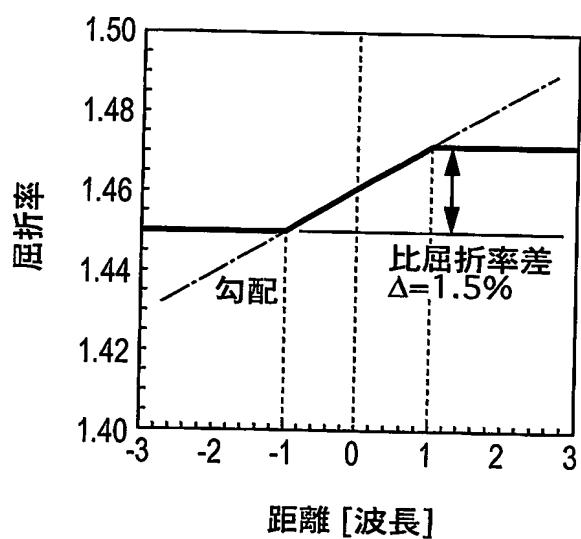


FIG.51A

FIG.51B

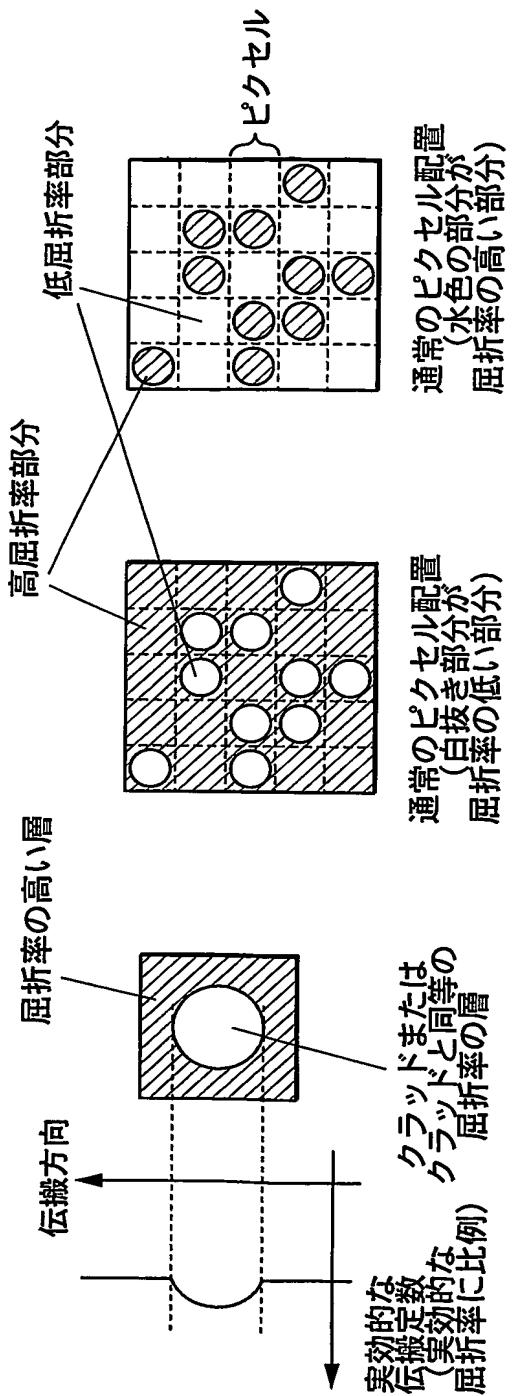


FIG.52B

FIG.52A

FIG.52C

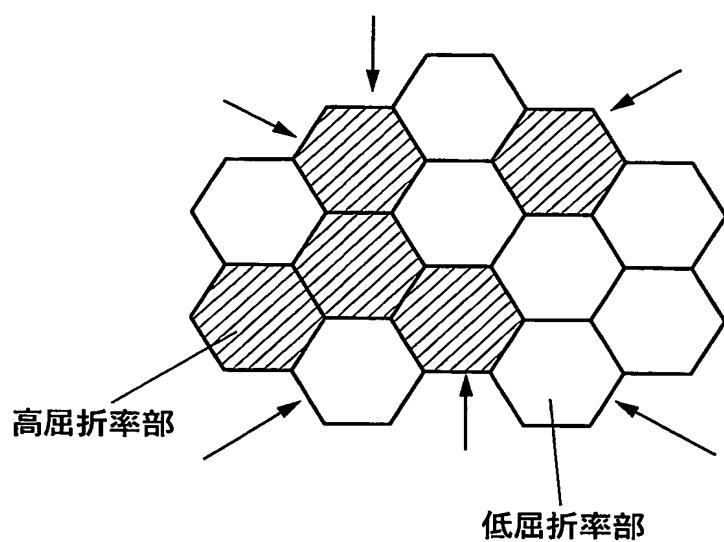


FIG.53

54/70

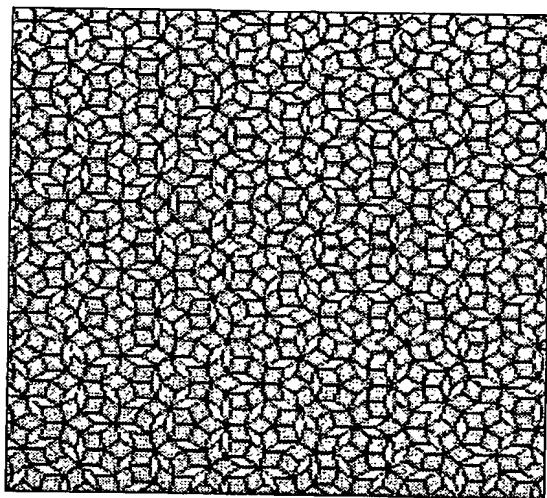


FIG.54

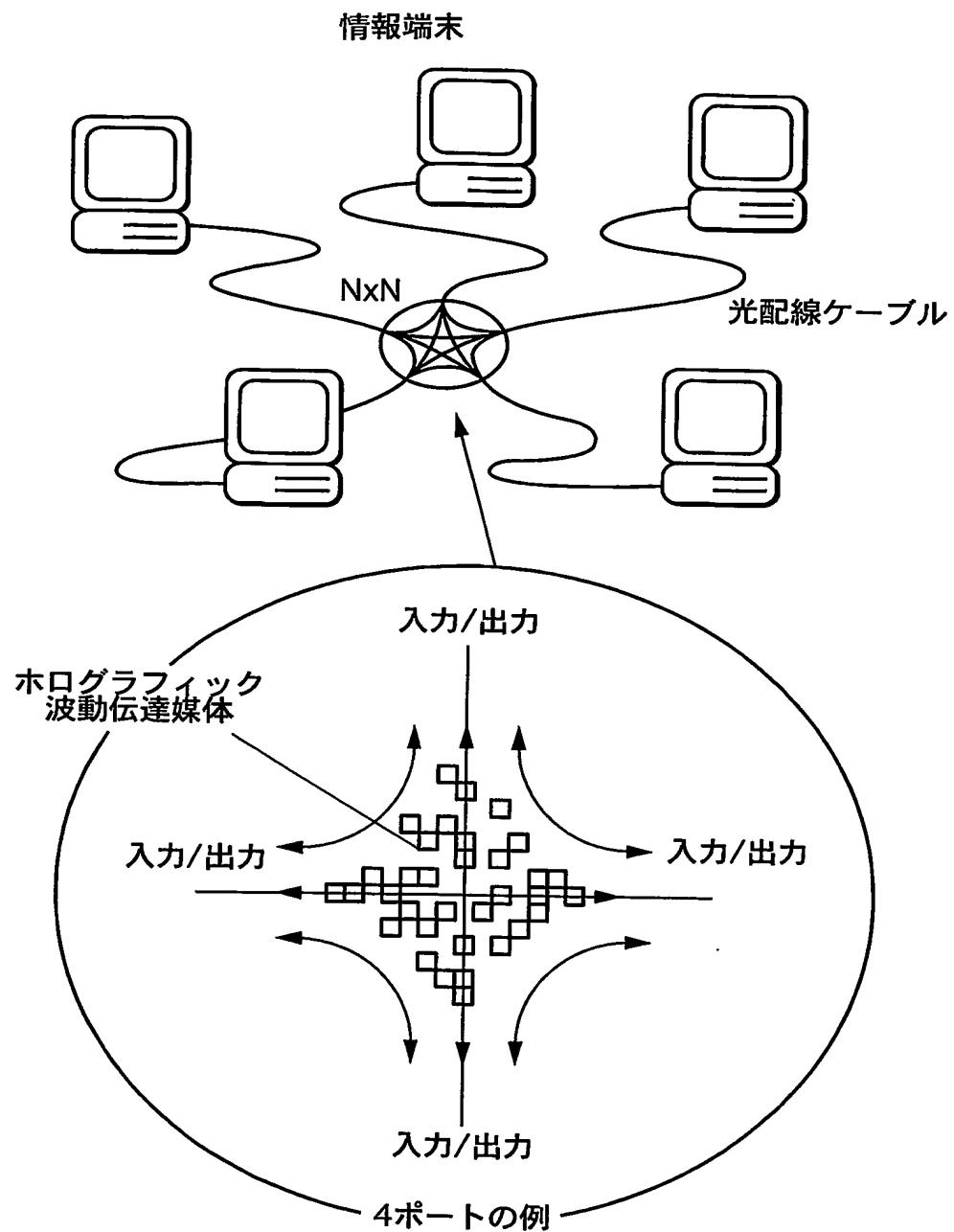


FIG.55

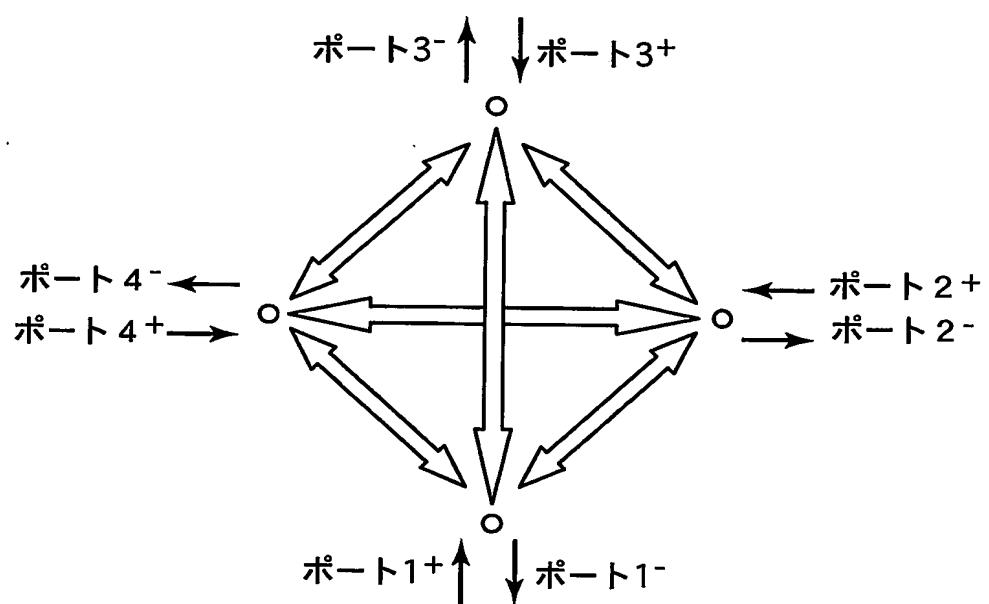


FIG.56

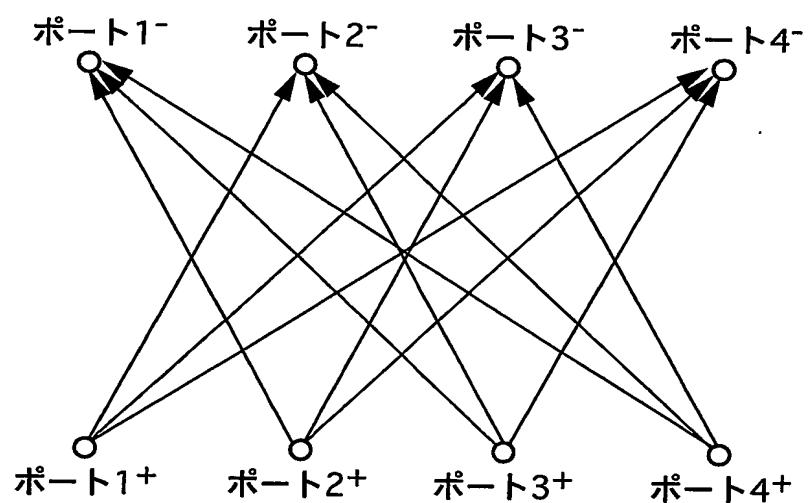


FIG.57

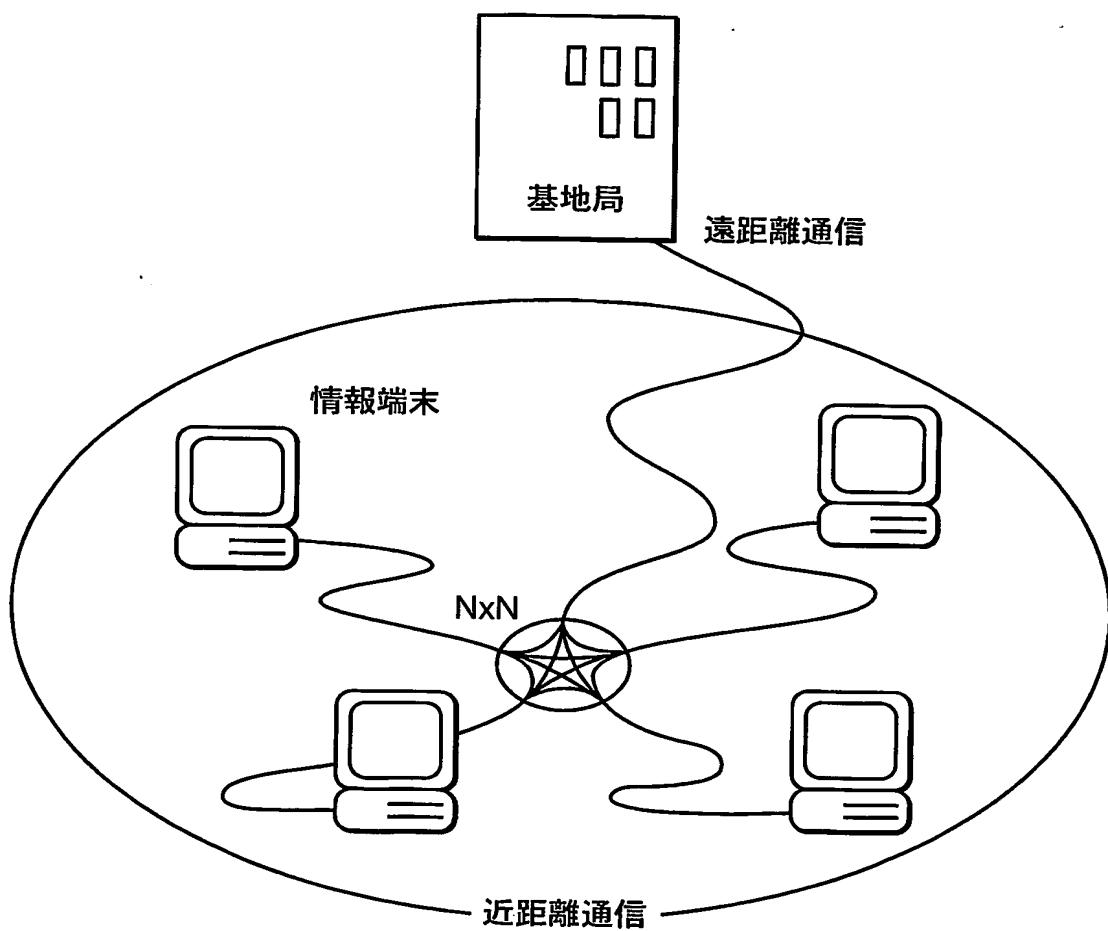


FIG.58

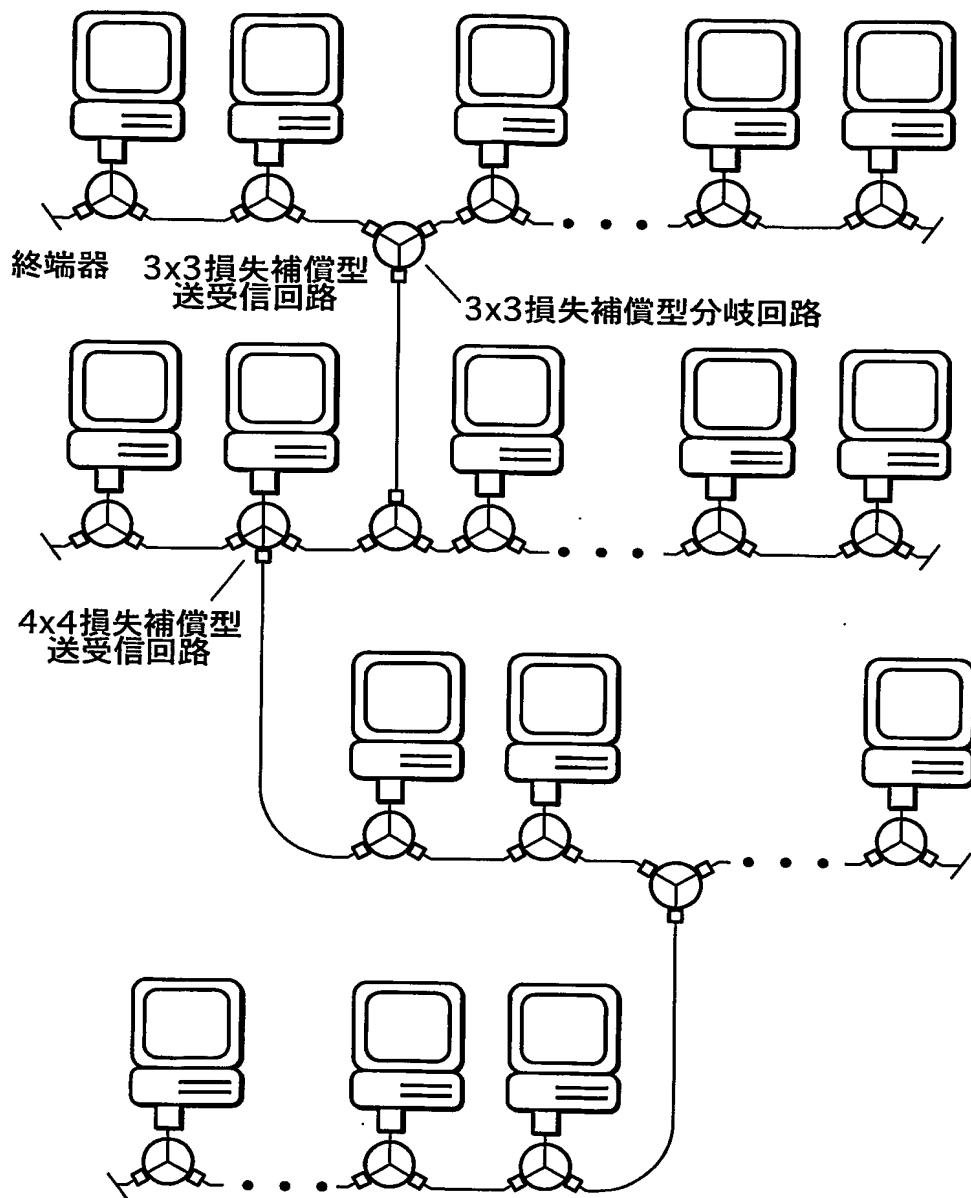


FIG.59

60/70

入射位置 位置依存性
入射位置 波長依存性

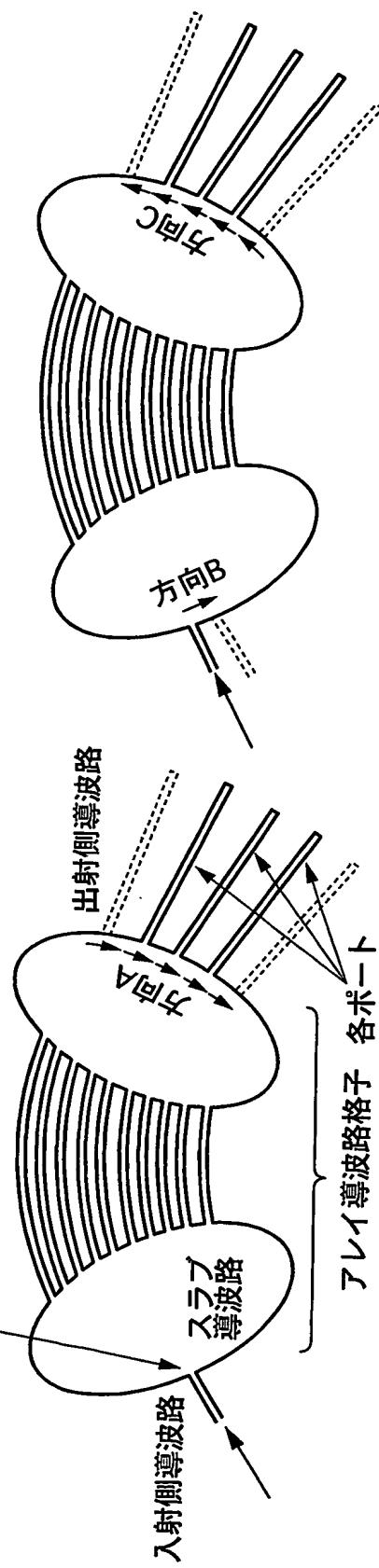


FIG.60A

FIG.60B

61/70

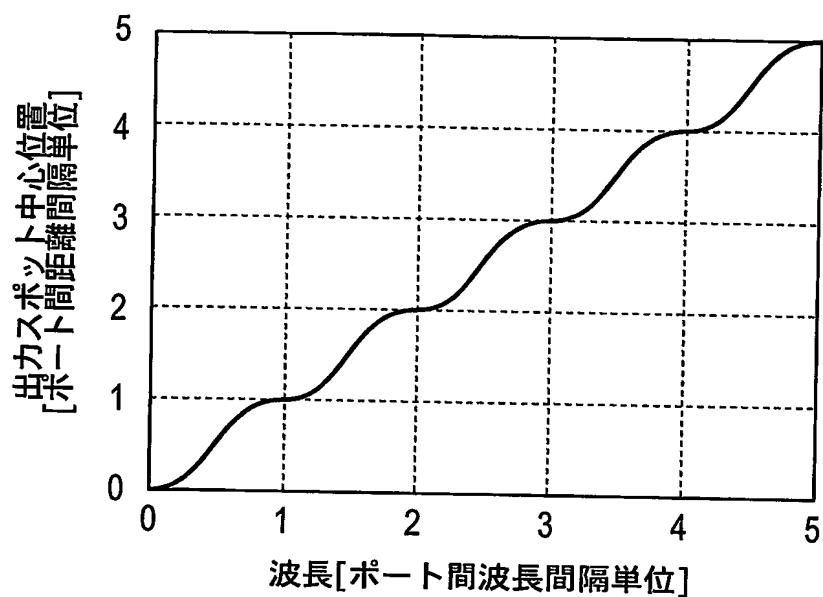


FIG.61

62/70

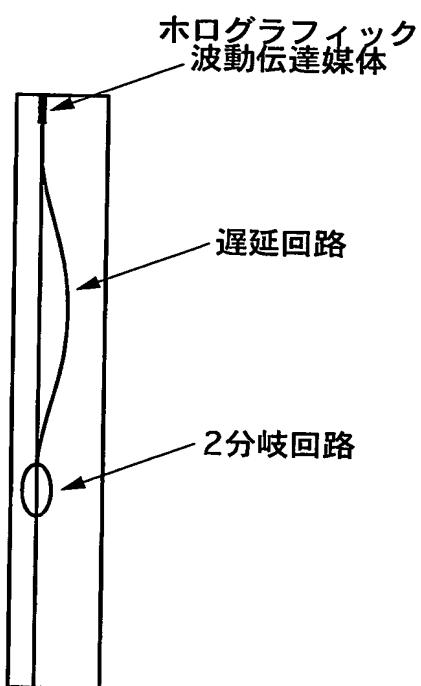


FIG.62

63/70

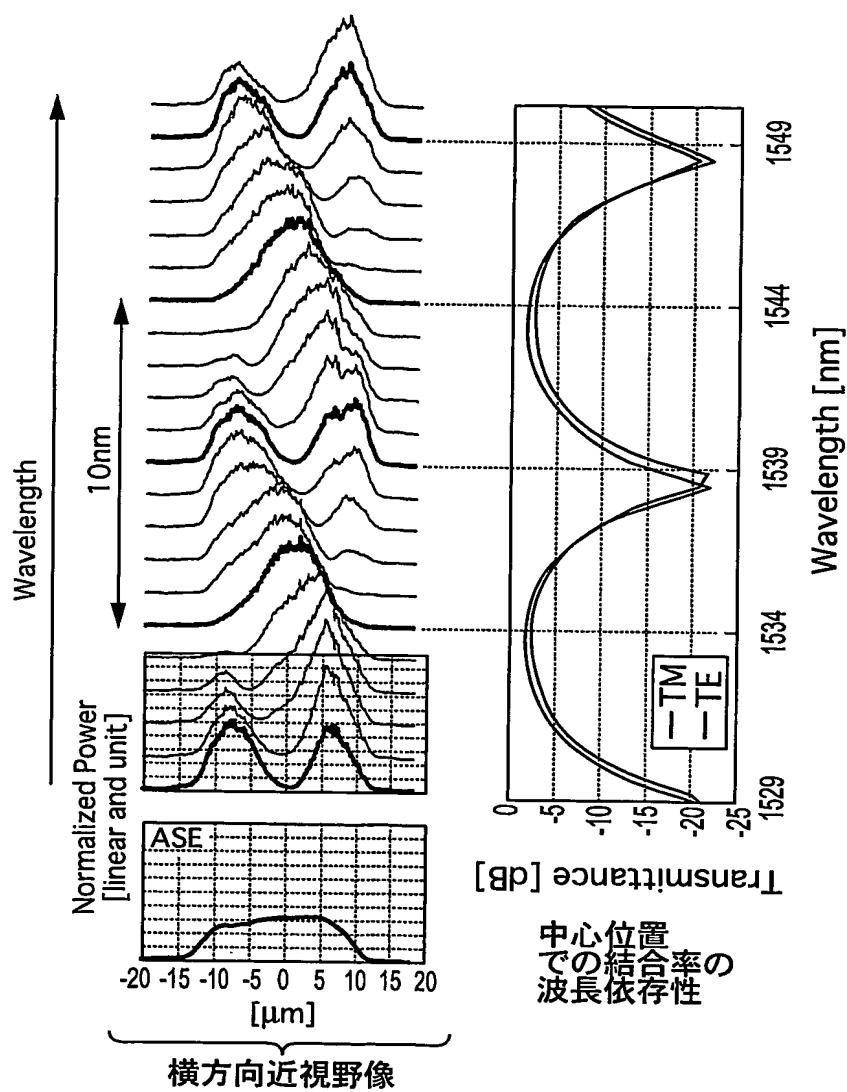


FIG.63

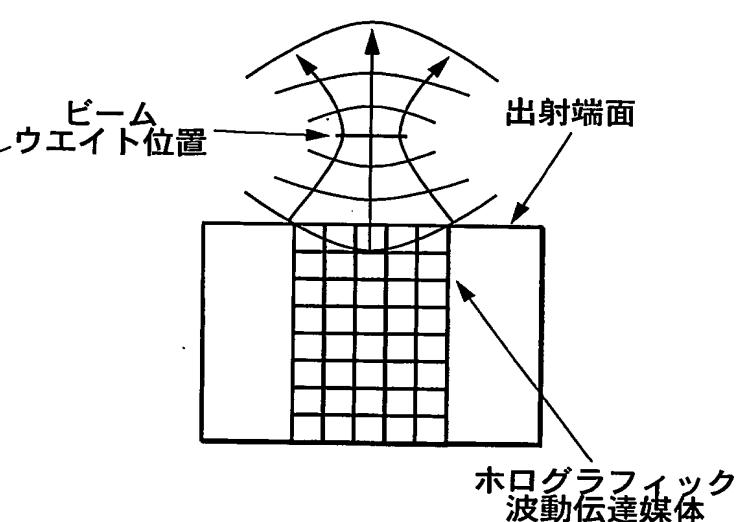
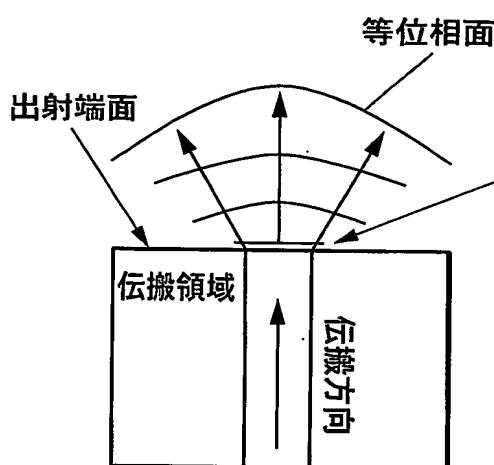


FIG.64A

FIG.64B

65/70

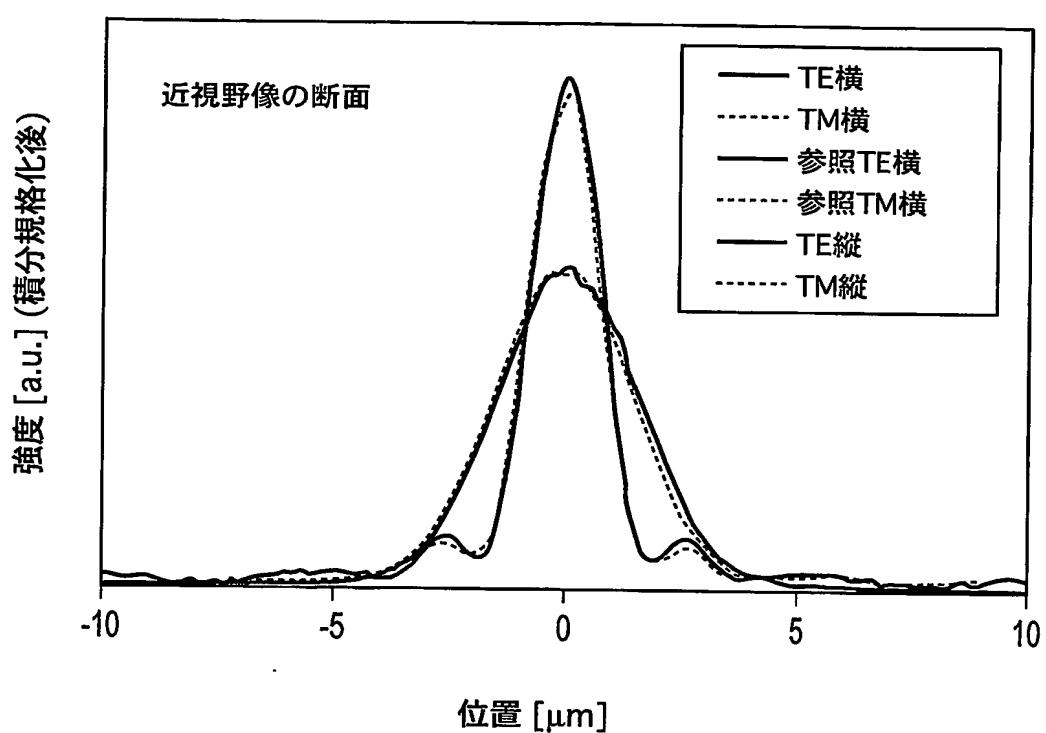


FIG.65

66/70

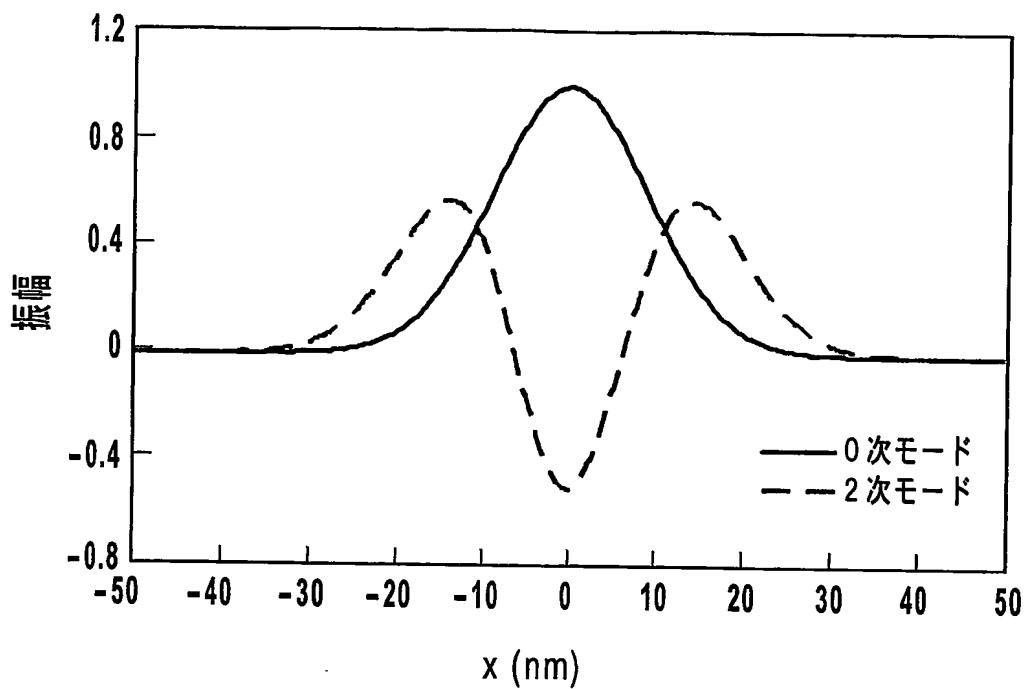
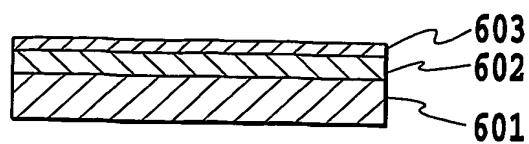
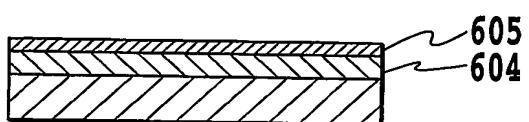
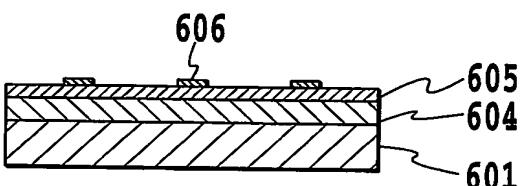
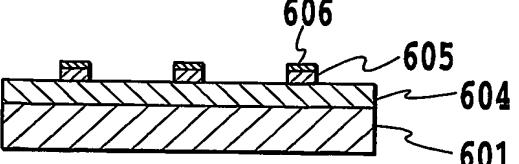
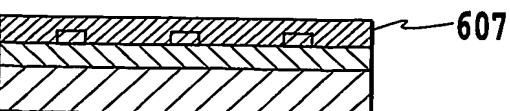


FIG.66

67/70

FIG.67A**FIG.67B****FIG.67C****FIG.67D****FIG.67E**

68/70



FIG.68

69/70

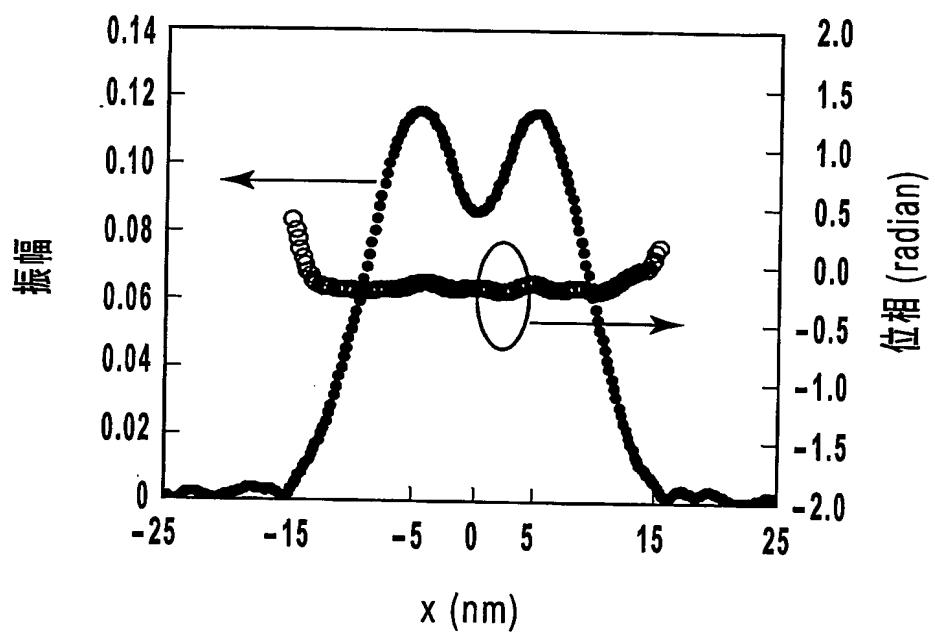


FIG.69

70/70

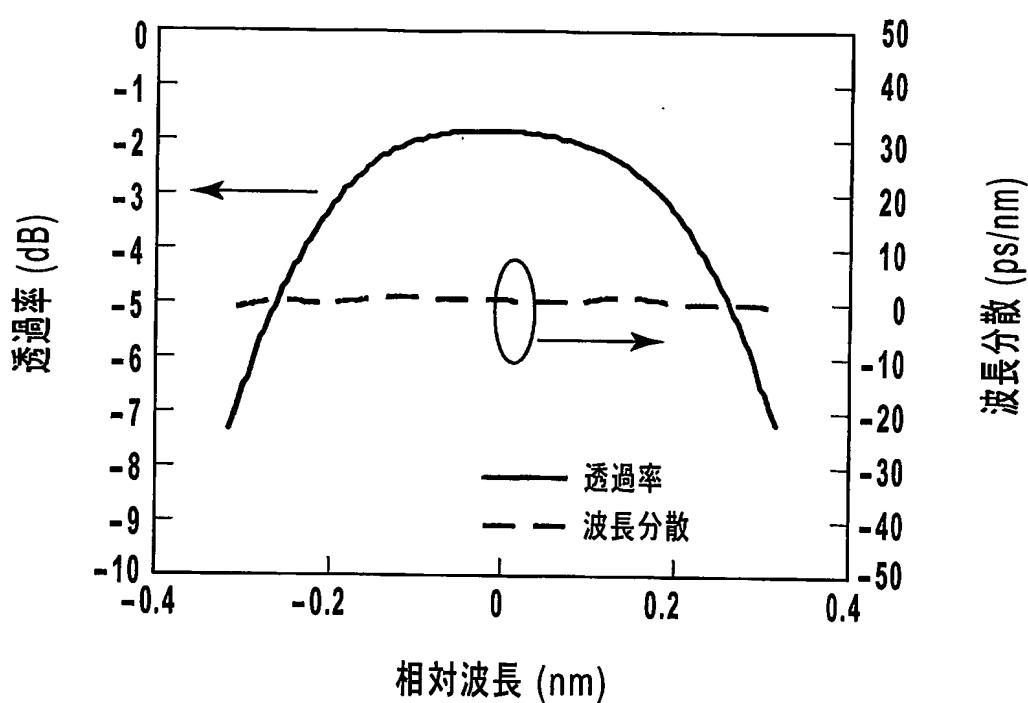


FIG.70

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP03/16725

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl' G02B6/13

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
Int.Cl' G02B6/13

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
 Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2004
 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2004 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2004

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X A	JP 10-186184 A (Fuji Xerox Co., Ltd.), 14 July, 1998 (14.07.98), (Family: none)	1-3, 5, 6, 11, 20, 24, 27, 32, 36, 41, 4, 7-10, 21-23, 25, 26, 28-31, 33-35, 37-40, 42-57.
X A	JP 53-100848 A (Oki Electric Industry Co., Ltd.), 02 September, 1978 (02.09.78), (Family: none)	1-3, 5, 6, 11 4, 7-10, 20-57.
A	1999 Nen The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers Sogo Taikai Koen Ronbunshu Electronics 1, 08 March, 1999 (08.03.99), pages 510 to 511	12-19.

Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier document but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family
---	--

Date of the actual completion of the international search 30 March, 2004 (30.03.04)	Date of mailing of the international search report 13 April, 2004 (13.04.04)
--	---

Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office	Authorized officer
--	--------------------

Facsimile No.	Telephone No.
---------------	---------------

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. C17 G02B6/13

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. C17 G02B6/13

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2004年
日本国登録実用新案公報	1994-2004年
日本国実用新案登録公報	1996-2004年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X	JP 10-186184 A (富士ゼロックス株式会社), 1998.07.14 (ファミリーなし)	1-3, 5, 6, 11, 20, 24, 27, 32, 36, 41
A		4, 7-10, 21-23, 25, 26, 28-31, 33-35, 37-40, 42-57

 C欄の続きにも文献が列挙されている。 パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

- 「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
- 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
- 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献(理由を付す)
- 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
- 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

30.03.04

国際調査報告の発送日

13.4.2004

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

日夏 貴史

2K 3313



電話番号 03-3581-1101 内線 3253

C(続き) .	関連すると認められる文	
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X	J P 53-100848 A (沖電気工業株式会社), 1978. 09. 02 (ファミリーなし)	1-3, 5, 6, 11
A		4, 7-10, 20-57
A	1999年電子情報通信学会総合大会講演論文集エレクトロニクス1, 1999. 03. 08, p. 510-511	12-19

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- BLACK BORDERS**
- IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- FADED TEXT OR DRAWING**
- BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- SKEWED/SLANTED IMAGES**
- COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- GRAY SCALE DOCUMENTS**
- LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.